

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Trabajo Fin De Master

**COMPROBACIÓN DEL ESTADO DEL
AISLAMIENTO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS
ROTATIVAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE
ENSAYOS OFFLINE**

Presentado por: D. Rubén Darío Carrión Jaura

Dirigido por: Dr. José Alfonso Antonino Daviu

Valencia, octubre de 2016

Contenido

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	OBJETIVOS	3
	Objetivo General.....	3
	Objetivos específicos.	3
1.3	ESTRUCTURA DEL TRABAJO	4
II.	ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1	GENERALIDADES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	5
2.2	PARTES DE UN MOTOR ELÉCTRICO	6
2.2.1	Rotor	6
2.2.2	Estator	7
2.2.3	Eje	8
2.2.4	Rodamientos y cojinetes	8
2.2.5	Carcasa.....	8
2.2.6	Caja de conexiones	9
2.2.7	Placa de características.....	9
2.3	FALLAS COMUNES EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS	10
2.3.1	Fallas Eléctricas	11
2.3.2	Fallas mecánicas.	11
2.3.3	Proporción de fallas que se dan en un motor eléctrico.....	11
2.3.3.1	Falla en rodamientos	12
2.3.3.2	Fallas en el devanado del estator.....	17
2.3.3.3	Factores externos	21
2.4	MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS.....	25
2.4.1	Métodos Off-Line.	25
2.4.2	Termografía.....	27
2.4.2.1	CAMARA TERMOGRÁFICA.....	31
2.4.3	Análisis de vibraciones	33

2.4.4	Análisis espectral de corrientes del estator	38
2.4.5	Descargas parciales.....	41
III.	DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE MOTORES TRIFÁSICOS ROTATIVOS MEDIANTE MÉTODOS OFFLINE.....	44
3.1	Sistemas Aislante.....	44
3.1.1	Estructura Del Aislamiento.....	45
3.2	Resistencia del aislamiento a tierra.....	46
3.3	Índice de polarización.....	51
3.4	Prueba estándar capacitiva (rastreo de arco).....	54
3.5	Prueba Hi-Pot.....	56
3.5.1	Tipos de prueba Hi-Pot	57
3.6	Prueba de impulso o surge	59
3.7	Medida de inductancia fase a fase.....	61
3.8	Desventajas de las técnicas Offline.....	63
IV.	EQUIPO Y MOTORES ANALIZADOS	64
4.1	MOTORES	64
4.1.1	MOTOR ASÍNCRONO INDAR	64
4.1.2	MOTOR SÍNCRONO INDAR	66
4.1.3	MOTOR ASÍNCRONO GENERAL ELECTRIC FM132MX/4	67
4.1.4	MOTOR SIEMENS 1LE10011AB422AH4	68
4.1.4	MOTOR SIEMENS 1LA20904AA10	69
4.1.5	MOTOR SIEMENS 1LA7090 4AA10	70
4.1.6	MOTOR ZALDI.....	71
4.2	MEGGER MIT 1025	72
V.	RESULTADOS.....	74
5.1	Motor asíncrono Indar.....	74
5.1.1	Resistencia de aislamiento	74
5.1.2	Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)	76
5.1.3	Índice De Polarización.....	77
5.2	Motor Síncrono Indar.....	79
5.2.1	Resistencia de aislamiento	79
5.2.2	Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)	80
5.2.3	Índice De Polarización.....	81

5.3 Motor Siemens Asíncrono 1LA20904AA10	83
5.3.1 Resistencia de aislamiento	84
5.3.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)	85
5.3.3 Índice De Polarización.....	87
5.4 Motor General Electric FM132MX	89
5.4.1 Resistencia de aislamiento	89
5.4.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)	91
5.4.3 Índice De Polarización.....	91
5.5 Motores Siemens 1LA7090-4AA10 Y 1LE10011AB422AH4	92
5.5.1 Resistencia de aislamiento	92
5.5.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)	94
5.5.3 Índice De Polarización.....	95
5.6 Motor Zaldi.....	96
5.6.1 Resistencia de aislamiento	96
5.6.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)	97
5.6.3 Índice De Polarización.....	98
5.7 Prueba Hi-Pot en motores Zaldi, 1LA7090-4AA10 y 1LE10011AB422AH4.	100
5.7.1 CURVAS DE CORRIENTE.....	100
VI Coste De Implantación	103
VII Conclusiones	105
Bibliografía:	107

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1. PARTES PRINCIPALES DE UN MOTOR ELÉCTRICO. [3].....	6
FIGURA 2. PORCENTAJE DE FALLAS DE LOS ELEMENTOS DE UN MOTOR ELÉCTRICO CONFORME ABB.	12
FIGURA 3. LUBRICACIÓN DEFICIENTE PROVOCADA POR LA ENTRADA DE FLUIDO DE CORTE EN EL INTERIOR DEL RODAMIENTO. [6]	13
FIGURA 4. PATINAJE DE RODILLO POR EXCESO DE GRASA. [6]	13
FIGURA 5. PATINAJE EN LA SUPERFICIE DE LA PISTA POR UN LUBRICANTE INADECUADO. [6]	14
FIGURA 6. DESCAMACIÓN A LO LARGO DE LA PISTA POR DESALINEACIÓN. [6]	14
FIGURA 7. RALLADURAS LATERALES EN ANILLO INTERNO POR EXCESO DE CARGA AXIAL. [6]	15
FIGURA 8. DESGASTE EN PISTA POR VIBRACIÓN DE ORIGEN EXTERNA. [6].....	15
FIGURA 9. RALLADURAS EXTERNAS PRODUCTO DE LA TENSIÓN DE AJUSTE PROVOCADA POR LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL ANILLO INTERNO Y EL EJE. [6]	16
FIGURA 10. CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS. [7]	17
FIGURA 11. CORTOCIRCUITO ENTRE FASES. [7]	18
FIGURA 12. CORTO EN LA CONEXIÓN. [7]	18
FIGURA 13. CORTOCIRCUITO EN LA RANURA [7].....	19
FIGURA 14. Desequilibrio de tensión [7].....	19
FIGURA 15. ROTOR BLOQUEADO. [7].....	20
FIGURA 16. SOBRECALENTAMIENTO. [7]	20
FIGURA 17. FALLO EN FASE CONEXIÓN EN ESTRELLA Y TRIÁNGULO. [7]	21
FIGURA 18. MOTOR CON BARRA ROTA. [9]	24
FIGURA 19. DESALINEACIÓN A) PARALELA B) ANGULAR [10].....	25
FIGURA 20. LONGITUDES DE ONDA [14]	27
FIGURA 21. LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN [18].....	30
FIGURA 22. PARTES DE NA CÁMARA TERMOGRAFÍA [20]	31
FIGURA 23. MOTOR CON PROBLEMA DEL BOBINADO INTERNO [20].....	32
FIGURA 24. CARACTERÍSTICAS DE UNA ONDA. [23].....	34
FIGURA 25. ESPECTRO DE FRECUENCIA.	35
FIGURA 26. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DE VIBRACIÓN DE UNA MÁQUINA [24].....	36
FIGURA 27. AUMENTO DE LA AMPLITUD DE LA FRECUENCIA DE PASO Fpb. DE LAS BARRAS DEL ROTOR. .	38
FIGURA 28. ESQUEMA DE REALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE CORRIENTE [26]	39
FIGURA 29. FRECUENCIA DE LA CORRIENTE DE UNA FASE DE UN MOTOR ELÉCTRICO, CON BARRA ROTA. [25].....	40
FIGURA 30. ESPECTRO DE CORRIENTE DE MOTOR IDEAL. A) SIN FALLA B) CON FALLA. [28]	41
FIGURA 31. DESCARGAS PARCIALES PRODUCIDAS DURANTE UN CICLO DE TENSIÓN [29]	42
FIGURA 32. ESQUEMA DE MEDICIONES DE LAS DESCARGAS PARCIALES. [30].....	42
FIGURA 33. DISTRIBUCION DE DESCARGAS VERSUS SU FASE APARICIÓN Y MAGNITUD DE LA DESCARGA [31].....	43
FIGURA 34. DIFERENTES ESTRUCTURAS AISLANTES APLICADAS EN FORMA DE CINTAS PARA A) BARRAS TIPO ROEBEL, B) DEVANADO PREFORMADAS [32]	45
FIGURA 35. CORRIENTE CAPACITIVA, DE FUGA Y ABSORCIÓN. [33].....	47
FIGURA 36. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS DEL ESTATOR. A) CONEXIONADO EN ESTRELLA, B) CONEXIONADO EN TRIÁNGULO	47
FIGURA 37. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CADA FASE	48
FIGURA 38. CURVAS DE COEFICIENTE Kt PARA UNA TEMPERATURA BASE DE 40 °C, IEEE [34].....	50
FIGURA 41. CURVAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DURANTE EL ENSAYO DE ÍNDICE DE POLARIZACIÓN. [37].....	54
FIGURA 39. FORMACIÓN DE UN CAPACITAR CON LA CONTAMINACIÓN DEL DEVANADO [9]	55

FIGURA 40. CONEXIÓN PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO HI-POT. [40]	57
FIGURA 42. CURVAS TÍPICAS DE CORRIENTE EN EL TIEMPO DE UNA PRUEBA HI-POT. [41].....	58
FIGURA 43. RESPUESTA SURGE DEL SISTEMA. [43]	59
FIGURA 44. ESQUEMA BÁSICO DE ENSAYO DE PRUEBA SURGE. [42].....	60
FIGURA 45. A) BOBINAS SANAS, B) BOBINAS DEFECTUOSAS [44]	61
FIGURA 46. MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO MARCA INDAR 15 CV.	64
FIGURA 47. MOTOR TRIFÁSICO SÍNCRONO INDAR DE 4 kW.	66
FIGURA 48. MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO GENERAL ELECTRIC FM132MX/4	67
FIGURA 49. MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO SIEMENS 1LE10011AB422AH4	68
FIGURA 50. MOTOR SIEMENS MODELO 1LA20904AA10 A) MOTOR EN CORRECTO ESTADO.	69
FIGURA 51. MOTOR SIEMENS 1LA7090 4AA10	70
FIGURA 52. MOTOR ZALDI	71
FIGURA 53. MEGGER MIT 1025.....	72
FIGURA 54. CURVA DE RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO OBTENIDA A TRAVÉS DEL SOFTWARE POWER DB	72
FIGURA 55. RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO ENTRE CADA FASE Y TIERRA EN EL MOTOR ASÍNCRÓNICO INDAR 11385 CORREGIDO A 40 GRADOS.	75
FIGURA 56. RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO ENTRE CADA FASE Y TIERRA EN EL MOTOR ASÍNCRÓNICO INDAR 11381 CORREGIDO A 40 GRADOS.	75
FIGURA 57. CURVA DE ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS INDAR 11385 Y 11381.77	
FIGURA 58. INSPECCIÓN DEL ESTADO INTERNO INTERNA DEL MOTOR 11381	78
FIGURA 59. RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO ENTRE CADA FASE Y TIERRA EN LOS MOTORES SÍNCRONOS INDAR 11384 13382 11380 CORREGIDO A 40 GRADOS	79
FIGURA 60. CURVA DE ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LOS MOTORES SÍNCRONOS INDAR 11384, 11382 Y 11380.....	81
FIGURA 61. INSPECCIÓN DEL ESTADO INTERNO INTERNA DEL MOTOR 11380, 11382, 11384	83
FIGURA 62. RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO ENTRE CADA FASE Y TIERRA EN LOS MOTORES ASÍNCRONOS 1LA2004AA10 CORREGIDOS A 40 GRADOS.....	84
FIGURA 63. CURVA DE ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS SIEMENS 1LA2004AA10.	87
FIGURA 64. ESTADO ACTUAL DE LOS MOTORES 2124610 (REBOBINADO) Y 2124593 (ESPIRAS ROTAS).....	89
FIGURA 65. RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO ENTRE CADA FASE Y TIERRA EN EL MOTOR GENERAL ELECTRIC FM132MX CORREGIDOS A 40 GRADOS	90
FIGURA 66. CURVA DE ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS SIEMENS GENERAL ELECTRIC FM132MX.	91
FIGURA 67. RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO ENTRE CADA FASE Y TIERRA EN LOS MOTORES SÍNCRONOS INDAR 11384 13382 11380 CORREGIDO A 40 GRADOS	93
FIGURA 68. CURVA DE ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LOS MOTORES SÍNCRONOS INDAR 11384, 11382 Y 11380.....	95
FIGURA 69. RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO ENTRE CADA FASE Y TIERRA EN EL MOTOR ZALDI CORREGIDOS A 40 GRADOS	97
FIGURA 70. CURVA DE ÍNDICE DE POLARIZACIÓN DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS ZALDI.	98
FIGURA 71. ESTADO EN EL QUE SE ENCUENTRA EL ESTATOR DEL MOTOR ZALDI.....	99
FIGURA 72. ESCALONES DE TENSIÓN, PRUEBA HI-POT.	100
FIGURA 73. CURVA OBTENIDA DURANTE LA PRUEBA HI-POT DEL MOTOR 1LE10011AB422AH4.	101
FIGURA 74. CURVA OBTENIDA DURANTE LA PRUEBA HI-POT DEL MOTOR ZALDI.....	101
FIGURA 75. CURVA OBTENIDA DURANTE LA PRUEBA HI-POT DEL MOTOR SIEMENS 1LA7090-4AA10 .102	

RESUMEN

El presente trabajo fin de master se centra en la utilización de técnicas de diagnóstico off-line, para establecer el estado en el cual se encuentra el sistema aislante a una gama de motores de distinto modelo y potencia, pero que han trabajado bajo la misma condición ambiental.

El documento se desarrolla principalmente bajo la aplicación de la norma IEEE 43-2013 e IEEE 95-2002, estas normas establecen una serie de criterios a considerar durante los diferentes tipos de pruebas de resistencia de aislamiento, así como para la evaluación de los datos obtenidos durante la fase de Diagnóstico.

Se parte realizando una sencilla recopilación bibliográfica de las fallas presentes en los motores eléctricos, continuando con la descripción de diversas técnicas utilizadas que permiten diagnosticarlas. Posteriormente se realiza un estudio profundo de las técnicas offline, describiendo su fundamento científico, proceso como alcance.

Para la recopilación de la información se optó por la utilización del instrumento de medida Megger MiT 1025 que permite realizar y guardar un gran número de ensayos offline para su posterior procesamiento. A los motores se les ha realizado en su mayoría cuatro tipos de ensayos, la medición de la resistencia de aislamiento IR, la medición de la relación de absorción dieléctrica D.A.R., el índice de polarización I.P. y la prueba de alto potencial Hi-Pot. Entre los tipos de pruebas de alto potencia se ha optado por la realización del ensayo de voltaje a escalones conocida también como Hi-pot Step Voltage ya que resulta menos estresante para nuestros motores.

Finalmente se realiza el estudio de la información recopilada comparándola entre los valores límites descritos en las normas, como los valores de tendencia existentes entre los motores del mismo tipo y potencia. En la mayoría de los casos los resultados obtenidos durante los ensayos fueron evaluadas inmediatamente después de finalizar cada prueba, para evitar que cuando existiere alguna alteración inusual comprobar que efectivamente que el resultado proviene de la máquina y no una falla del equipo de medida.

Palabras clave: índice de polarización, relación de absorción dieléctrica, diagnóstico de motores, resistencia de aislamiento, ensayos offline, Hi-Pot, alto potencial

I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza la introducción al trabajo a través de los antecedentes, se marca el objetivo general como aquellos parciales que se desea conseguir, además de comentar brevemente como está estructurado el trabajo realizado.

1.1 Antecedentes

Los motores eléctricos son uno de los componentes más utilizados e importantes en el sector industrial. Aunque son elementos muy fiables con un índice muy bajo de averías, la tendencia actual de algunos fabricantes a volverlos más comerciales con un menor coste, implica que trabajen lo más próximos a sus límites de resistencia mecánica y electromagnética.

Adicionalmente a esto se suma la exigencia de las industrias actuales a obtener una producción de elevada calidad y sin interrupciones. Esto conlleva a que las fábricas y en especial en aquellas donde estos motores eléctricos formen una parte vital del proceso de producción, lleven seguimiento constante de su funcionamiento y estado, especialmente cuando son utilizados en ambientes hostiles o posean una alta severidad en su funcionamiento, factores que provocan una menor duración de su vida útil e incremento de su deterioro.

Un plan de mantenimiento adecuado a nuestros motores eléctricos prevendrá un paro inesperado, permitiéndonos evitar importantes pérdidas económicas debido a la interrupción de los procesos de producción. Uno de los desafíos más grandes a la hora de realizar cualquier tipo de mantenimiento es ser capaz de reconocer, diagnosticar prevenir y solucionar las fallas que se puedan dar en los motores eléctricos.

EL presente trabajo se ubica dentro del campo de diagnóstico de motores centrándose en la utilización de técnicas off-line con las que se pretende establecer el estado en el cual se encuentra su sistema aislante. De igual forma se han analizado, los diferentes tipos de fallas como de métodos de diagnóstico que más se usan en el mercado, describiendo brevemente en qué consisten, su principal aplicación como limitaciones

que poseen. Esto permitirá facilitar su correcta elección a la hora de presentarse algún problema en el funcionamiento de nuestros motores.

Los distintos avances en los campos de la electrónica, informática como el estudio nuevo materiales han estimulado el desarrollo de dispositivos de diagnóstico más asequibles, fiables, precisos y menos intrusivos que pueden establecer fácilmente el estado en que se encuentran las máquinas en tiempo real. Por lo que en un futuro estos sistemas pasaran a formar parte integral del sistema de diagnóstico a bordo, permitiendo así, el fácil desarrollo y aplicación de diversas técnicas de mantenimiento.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es poder establecer el estado en el cual se encuentra el sistema aislante de una máquina eléctrica rotativa mediante la aplicación de algunas técnicas off-line.

Objetivos específicos.

- Conocer los diferentes tipos de fallas tanto mecánicas como electromecánicas que puedan producirse en una máquina eléctrica rotativa.
- Conocer las diferentes técnicas de diagnóstico presentes en el mercado, sus fundamentos, aplicaciones como las limitaciones, que puedan poseer.
- Aplicar las técnicas offline que presten una mayor relevancia sobre motores de diferente potencia y tipo.
- Diagnosticar mediante el estudio y comparación de sus gráficas el estado de los devanados en motores del mismo tipo
- Conocer los costos aproximados de inversión de las técnicas de implantación offline.

1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Capítulo II

En este capítulo se detallan las partes principales que conforman un motor, se establece los porcentajes de fallo de cada sistema, como los factores que lo provocan, además, se hace realiza una breve descripción de los métodos existentes para diagnosticar las fallas, estableciendo su principio utilidad y alcance.

Capítulo III

En este capítulo se profundiza en los métodos offline más utilizados en el sector industrial, se describe el principio en el cual se fundamente, como se debe realizar correctamente las conexiones, la normativa utilizada para su evaluación como las posibles soluciones que su pidiera dar a los motores que se encuentren con su aislamiento contaminado o deteriorado.

Capítulo IV

En este capítulo se realiza la descripción de los motores sobre los que se va a realizar los ensayos, se describirá sus características principales, como su tipo de aislamiento, potencia, tensión nominal, entre otros. De igual forma se realiza un pequeño historial de cada motor describiendo su antigüedad como pruebas que se han realizado sobre él.

Capítulo V

Aquí describe los resultados obtenidos durante la realización de cada ensayo, se efectúa la corrección de gráficas, se realiza un estudio comparativo de los datos obtenidos con respecto a las normas aplicadas, de igual forma se realiza la comparación de motores similares entre sí, con la finalidad de encontrar una evidencia que delate el estado de su aislamiento.

Capítulo VI

Se habla sobre los costos de implantación del sistema, realizando una comparación entre la adquisición contra el costo que de reparación de un motor de mediana tención en la industria.

II. ESTADO DEL ARTE

2.1 GENERALIDADES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

El motor eléctrico transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Son máquinas eléctricas rotatorias cuyos elementos principales son un estator y un rotor. Algunos de los motores eléctricos son reversibles, pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores. [1]

Pueden ser:

- **Motores de corriente continua.** – Son motores eléctricos que para su funcionamiento precisan de una fuente que proporcione corriente continua o a su vez un dispositivo que permita transformar la corriente alterna en continua. Este tipo de motores eléctricos permiten ajustar fácilmente su velocidad prestándose a controles de gran flexibilidad y precisión. [2] Uno de los inconvenientes que presentan este tipo de motores eléctricos, es el de poseer un costo elevado no solo de instalación sino de mantenimiento, es por ello que su uso se limita a procesos en el que las exigencias y beneficios obtenidos compensan su precio de adquisición.
- **Motores de corriente alterna.** - Son motores que para su funcionamiento precisan de una fuente de energía alterna la cual la pueden obtener directamente a través de la red de distribución de energía eléctrica. tienen una aplicación más generalizada gracias a su facilidad de utilización, además de requerir poco mantenimiento y poseer un bajo coste de fabricación. Sus principales tipos son:
 - **Síncronos.** – Son motores que funcionan con una velocidad fija, sin que exista una diferencia relativa entre la velocidad del campo magnético (deslizamiento) y la velocidad de giro del rotor, se los utiliza para

procesos donde se requiera una elevada potencia, debido a que su alto coste de fabricación para motores pequeños.

- **Asíncronos.** - Son motores que funcionan con una velocidad constante, existiendo una diferencia relativa entre la velocidad del campo magnético y la velocidad de giro del rotor, la cual varía ligeramente según la carga aplicada al eje. Debido a su gran simplicidad, robustez y bajo coste es el motor más usado de todos. Su velocidad puede ser controlada valiéndose de un convertidor de frecuencia.

2.2 PARTES DE UN MOTOR ELÉCTRICO

En este apartado se describe de una manera general las partes fundamentales que conforman un motor eléctrico, véase figura 1.

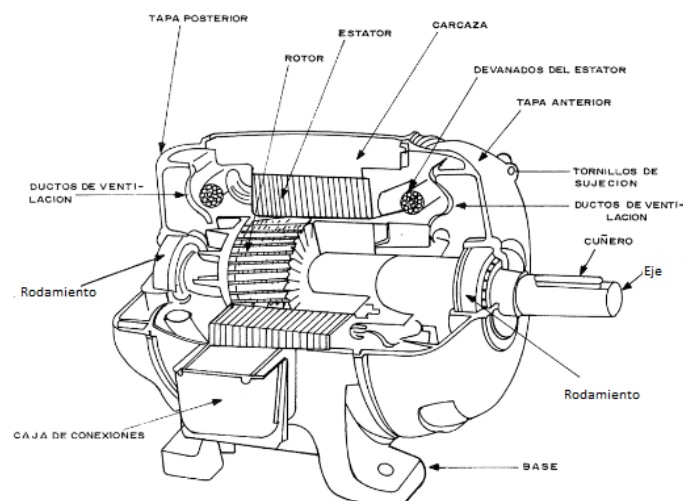


FIGURA 1. Partes principales de un motor eléctrico. [3]

2.2.1 Rotor

El rotor es el componente que gira en una máquina eléctrica, ya sea motor o generador. Está formado por un eje en el que se coloca un juego de bobinas las cuales se arrollan sobre un núcleo magnético que gira dentro de un campo magnético creado por un imán o por el paso por otro juego de bobinas, arrolladas sobre unas piezas polares, que

permanecen estáticas y que constituyen lo que se denomina estátor de una corriente continua o alterna, dependiendo del tipo de máquina de que se trate.

En máquinas de corriente alterna de mediana y gran potencia, la fabricación de los rotores se suele realizar con láminas de acero al silicio (acero eléctrico o magnético) para disminuir las pérdidas asociadas a los campos magnéticos variables, como las corrientes de Foucault o histéresis magnética.

Existen varios tipos de rotores:

- **Rotor de jaula de ardilla.** - Internamente está formado por barras conductoras longitudinales de aluminio o cobre, cuyos extremos se encuentran cortocircuitados conectándolos a unos anillos conductores conocidos como anillos extremos. Las ranuras se suelen hacer oblicuas respecto al eje para facilitar el arranque evitando de esta forma puntos de inducción muertos, además de producir un menor ruido al girar. [4]
- **Rotor bobinado.** - Los devanados que posee el rotor se conectan a unos anillos colectores montados sobre el eje, por medio de unas escobillas se conecta al rotor a una resistencia la cual puede ser variable, permitiendo controlar su velocidad y corriente de arranque.
- **Rotor de polo saliente.** - Un polo saliente es un polo magnético que se proyecta hacia fuera de la superficie del rotor. Los rotores de polos salientes se utilizan en rotores de cuatro o más polos.

2.2.2 Estator

Constituye la parte fija del motor. El estator es el elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor. Está constituido por una carcasa en la que se encuentran una especie de corona ranurada de chapa de acero al silicio en donde se colocaran los bobinados. El estator no se mueve mecánicamente, pero si magnéticamente.

2.2.3 Eje

Un eje es un elemento constructivo generalmente fabricado acero destinado a guiar el movimiento de rotación a una pieza o de un conjunto de piezas. El eje se aloja por un diámetro exterior al diámetro interior de un agujero, como el de un cojinete o rodamiento, con el cual posee un determinado tipo de ajuste.

2.2.4 Rodamientos y cojinetes

Son elementos que contribuyen a la óptima operación de las partes giratorias del motor eléctrico. Tienen la función de fijar el eje, sostenerlo y soportarlo además disminuir su fricción, alargar su vida, disminuir el consumo de potencia.

- **Cojinetes.** -Operan bajo el principio de la formación de una película de aceite, proceso en el cual se forma una delgada capa de lubricante entre el eje y la superficie de apoyo que evita que entre en contacto directo con ella, disminuyendo el rozamiento y desgaste.
- **Rodamientos.** – Es un elemento mecánico que reduce la fricción entre el eje y su punto de apoyo, consta de dos anillos, uno interno en el cual ira el eje y que estará comunicada por un elemento giratorio a un anillo externo el cual entrará en contacto con la carcasa. El elemento giratorio que une a los anillos puede ser de bolas, de rodillos o de agujas. En los rodamientos el movimiento rotativo, según el sentido del esfuerzo que soporta, puede ser axial, radial, o una combinación de ambos.

2.2.5 Carcasa

La carcasa es la parte que protege y cubre al estator y al rotor, el material empleado para su fabricación depende del tipo de motor, de su diseño y su aplicación. Generalmente el tipo de protección que proporciona la carcasa viene dado por una codificación IP. Esta codificación indica el grado de protección que brinda la máquina contra la facilidad de acceso de las personas a partes peligrosas, contra la penetración de cuerpos sólidos extraños, contra la penetración de agua como suministrar información adicional.

- El primer número que acompaña a las siglas IP, normalmente conocida como “primera cifra característica”, indica el grado de protección de las personas

contra el acceso a parte peligrosas, y esta graduada desde un valor mínimo de cero a un valor máximo de seis, a medida que va aumentando la cifra, el tamaño del cuerpo sólido que puede penetrar al interior del motor será menor.

- El segundo número que acompaña a las siglas IP, normalmente conocida como “segunda cifra característica”, indica el grado de protección que posee la máquina contra el ingreso de agua a su interior, y esta graduada desde un valor mínimo de cero a un valor máximo de ocho, a medida que va aumentando la cifra, mayor dificultad presentará la máquina para que el agua alcance el interior tanto en cantidad como en dirección.
- La tercera sigla que acompaña a las siglas IP, se la suele colocar de forma opcional y aporta información sobre la accesibilidad de determinados objetos o partes del cuerpo al interior de la máquina.

2.2.6 Caja de conexiones

Aloja a los terminales de los devanados estáticos para facilitar su conexión y alimentación. Existen dos terminales por devanado y un devanado por fase es por tal motivo que en un motor trifásico el cual posee tres fases se encontrarán seis terminales para su conexión. Adicionalmente a ello la caja de conexiones es un elemento que protege y resguarda los terminales del contacto directo con las personas como de la acción mecánica que sobre ellos se pudieran ejercer o cualquier otro elemento que pudiera dañarlos.

2.2.7 Placa de características

La placa de características de un motor trifásico permite conocer rápidamente las condiciones de funcionamiento, tipo de servicio que puede ofrecer nuestro motor eléctrico como la precaución que se debe tener frente a su manipulación. En la tabla 1, se ha colocado algunos de las características más importantes que se podrían encontrar en una placa de un motor eléctrico.

Tabla 1. Contenido Placa de características

Características	
Clase de corriente.	Factor de potencia.
Tensión nominal.	Sentido de giro.
Intensidad nominal.	Velocidad nominal.
Potencia nominal.	Frecuencia nominal.
Régimen de funcionamiento nominal.	Clase de aislamiento.
Clase de protección.	Tamaño y posición

2.3 FALLAS COMUNES EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Son innumerables los factores que pueden producir daños a los motores eléctricos o a sus sistemas auxiliares. Con el propósito de alargar su vida útil y obtener de ellos la mayor prestación de sus servicios resulta necesario indagar profundamente en aquellos factores que producen sus averías. Se podría decir que las fallas de un motor eléctrico se pueden dividir en dos grandes grupos, una de tipo eléctrico y otra de tipo mecánico, aunque a algunas otras fallas, se le puede atribuir al entorno de trabajo como de condiciones de funcionamiento, generaran sin embargo alguno de los problemas anteriores.

Entre una de las fallas más comunes que se podría atribuir al entorno de trabajo y de funcionamiento de un motor eléctrico son las fallas relacionadas con el aislamiento pues su resistencia como vida útil se ve afectada por:

- Calor o frío excesivos.
- Humedad.
- Acumulación de polvo o suciedad.
- Ambiente corrosivo.
- Vibraciones excesivas.
- Envejecimiento.
- Sobrecarga.

2.3.1 Fallas Eléctricas

Las fallas eléctricas por lo general son ocasionadas por el deterioro del sistema de aislamiento de los devanados, provocadas por sobrecargas prolongadas, cuando el motor se encuentra operando con solamente una o dos fases, voltajes de alimentación desbalanceados o excesivos, polaridad incorrecta. Estos problemas pueden ser ocasionados por las malas conexiones, mala operación de los fusibles, la existencia de un mal contacto en los terminales, una mala calibración y selección de los sistemas de protección, etc.

2.3.2 Fallas mecánicas.

Por lo general las fallas mecánicas originan tres tipos de síntomas, existencia de una vibración excesiva, aumento en la temperatura de trabajo global o local, además de la presencia de ruido no característico con su funcionamiento normal. Estos síntomas son originados por una mala alineación o balanceado del rotor, existencia de desgaste o rozamiento, mala alineación entre motor y carga acoplada, bases de montaje defectuosas, falta de lubricación en cojinetes, inadecuado ajuste en las partes constructivas del motor, etc. Con lo que se pone en manifiesto que no solamente se debe controlar las condiciones eléctricas, sino que resulta necesario controlar las partes mecánicas del motor eléctrico y la máquina que impulsa.

2.3.3 Proporción de fallas que se dan en un motor eléctrico

Un estudio realizado por la ABB (Asea Brown Boveri) publicado el 16 de septiembre del 2015, establece cinco fallas más comunes en un motor eléctrico, véase figura 2, donde la principal fuente de problemas son los rodamientos con un porcentaje de falla del 51% provocados a menudo por insuficiente lubricación, mala elección de grasa, alta temperatura, etc.

Otros elementos importantes corresponden a los bobinados del estator como factores ambientales provocan un porcentaje de falla correspondiente al 32% inducido por sobrecarga, temperatura, humedad, entre otros factores.

Se podría decir que la falla en motores por deterioro del aislamiento se encuentra ocupando un gran parte de este 32% ya que por un lado se encuentran los factores ambientales, que a pesar de que afecta a la máquina de manera global, existen métodos

permiten proteger sus elementos mecánicos, como el uso o cambio de lubricantes y pinturas especiales, y aplicar métodos similares al sistema aislante además de difícil resultaría costoso. Por el otro lado el fallo en el devanado del estator en su gran porcentaje se debe a deterioro del aislamiento ya sea por sobrecarga o sobretensión, debido a que en el no existe ningún tipo de esfuerzo o acción mecánica.

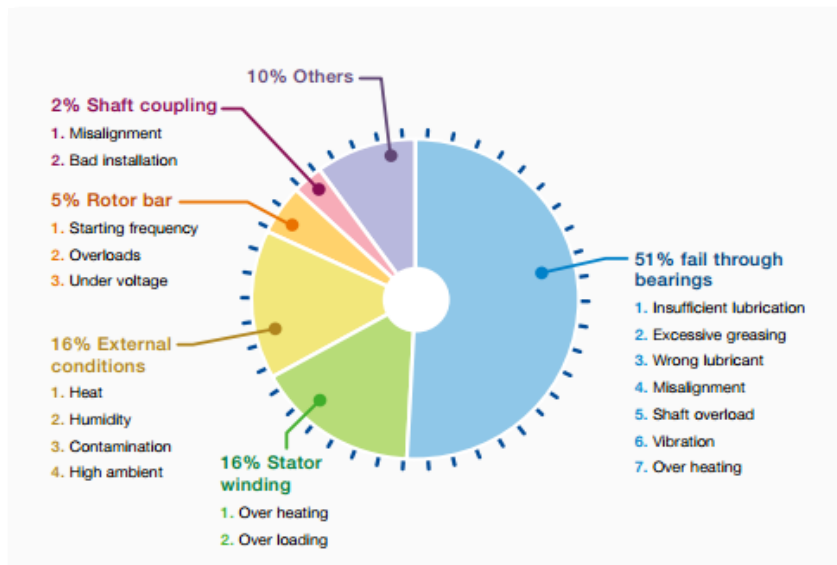


FIGURA 2. Porcentaje de fallas de los elementos de un motor eléctrico conforme ABB.

2.3.3.1 Falla en rodamientos

Cuando los rodamientos son utilizados y cuidados correctamente pueden durar por un largo periodo, hasta la vida de fatiga, generalmente los rodamientos utilizados en el sector industrial están diseñados para proveer más de 65000 horas de servicio sin falla [5]. Sin embargo, su vida se ve rápidamente disminuida por varios factores entre los cuales podemos encontrar:

- **Insuficiente lubricación.** - Generalmente es producto de una falta de mantenimiento, por lo general los rodamientos necesitan un re-engrase cada 2000 horas o tres meses. La información del tiempo óptimo de engrase se la puede encontrar algunas veces en la placa de características o en el manual del motor eléctrico.



FIGURA 3. Lubricación deficiente provocada por la entrada de fluido de corte en el interior del rodamiento. [6]

- **Excesivo engrase.** - El exceso de engrase en los rodamientos provoca su sobrecalentamiento por lo que este podría sufrir rápidamente una falla. Este problema se debe en algunos de los casos, a que las válvulas de alivio están cerradas durante el re-engrase por lo que no se produce la purga del exceso de grasa acumulándose en su interior. El retén de un rodamiento generalmente falla a los 500 psi, una pistola de engrase puede generar una presión de inyección de alrededor de 1500 psi. Por lo tanto, se debe inyectar la grasa lentamente para evitar la acumulación de presión. Para evitar el problema de engrase excesivo, se debe evitar que las válvulas de alivio no se encuentren obstruidas, limpiando cualquier suciedad o grasa endurecida.



FIGURA 4. Patinaje de rodillo por exceso de grasa. [6]

- **Uso del lubricante inadecuado.** - A nivel industrial las se utiliza una diferentes tipos y calidades de lubricantes por la gran diversidad de maquinaria existente, es por eso que a la hora de realizar un re-engrase es necesario comprobar que se está utilizando el grado y tipo adecuado de lubricante para evitar cualquier falla por desgaste, rozamiento o incremento de temperatura. No se debe mezclar los

lubricantes ya que algunos no son compatibles entre sí pudiendo anular completamente su función. Además, el uso inadecuado de lubricante puede generar un consumo eléctrico mayor, encareciendo los costos de producción.

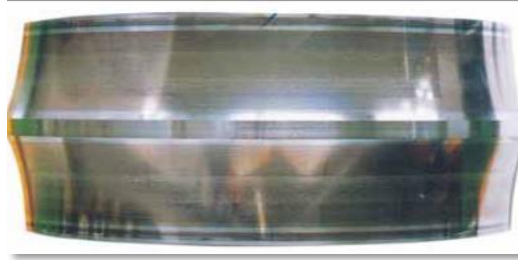


FIGURA 5. Patinaje en la superficie de la pista por un lubricante inadecuado. [6]

- **Desalineación.** - Es esencial que tanto el motor como su carga estén correctamente alineados, muchas veces se suelen alinear en frío sin considerar la dilatación térmica y las condiciones de funcionamiento a la cual estarán sometidos. Esto provoca que cuando esté en operación la deformación térmica entre la máquina y la carga haga trabajar al rodamiento bajo cargas axiales o radiales no prevista provocando su falla prematura. Algunas veces el resultado de la desalineación es producto de una mala instalación de los rodamientos a la hora del montaje.

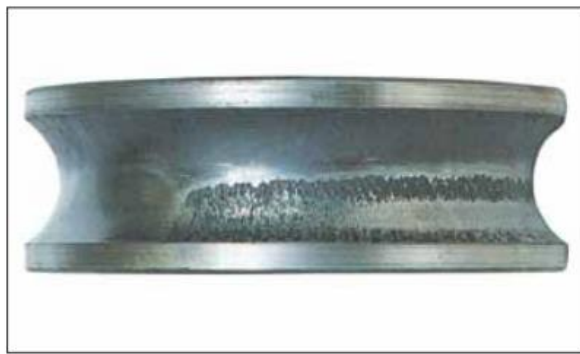


FIGURA 6. Descamación a lo largo de la pista por desalineación. [6]

- **Sobrecarga en el eje.** – Una excesiva carga puede provocar una falla prematura de un rodamiento siempre y cuando sea conveniente envés de utilizar un rodamiento de bolas se debería utilizar uno de rodillos para evitar la sobrecarga, un rápido desgaste de las correas o si esta se encuentra tocando el fondo de la polea es un sencillo signo visual que el eje se encuentra sobrecargado.



FIGURA 7. Ralladuras laterales en anillo interno por exceso de carga axial. [6]

- **Vibración.** - La vibración excesiva puede producir la falla prematura de un rodamiento, las vibraciones en un motor eléctrico pueden ser por un desequilibrio en el rotor, resonancia, rozamiento, falla del rodamiento, de tipo electromagnético de tipo externa, etc. Resulta indispensable monitorizar la vibración en tres planos, el horizontal, el vertical y el axial ya sea a través de acelerómetros o sensores de proximidad comparando los valores obtenidos con los descritos en la norma 18016, la cual evalúa la vibración en las máquinas mediante medidas tomadas en partes no rotativas considerando su velocidad de giro y potencia.



FIGURA 8. Desgaste en pista por vibración de origen externa. [6]

- **Sobre calentamiento.** – se debe considerar el entorno de trabajo del motor y si este se encuentra diseñado para las condiciones de temperatura en las cuales trabajara, por el motivo de los rodamientos poseen diferentes tolerancias para permitir la expansión térmica cuando se encuentren en funcionamiento, además se debería tener muy en cuenta que el lubricante utilizado en el rodamiento

soporte altas temperaturas, caso contrario sus propiedades antifricción y desgaste se verán disminuidas. Es conveniente mantener un ambiente fresco de funcionamiento del motor eléctrico ella aumentara en gran medida la vida útil, además por cada 15 grados centígrados por debajo de la temperatura de funcionamiento el intervalo de re-engrase aumentara al doble La temperatura de funcionamiento a la cual se encuentra sometido. El control de la temperatura se lo podría llevar a cabo a través de métodos no intrusivos por medio de una termografía o un pirómetro o por métodos intrusivos como puede ser el uso de una sonda pt100.



FIGURA 9. Ralladuras externas producto de la tensión de ajuste provocada por la diferencia de temperatura entre el anillo interno y el eje. [6]

Por otro lado, si conocemos la máquina dónde se utiliza el rodamiento, las condiciones de trabajo, la configuración de los conjugados y si la situación anterior y posterior al ocurrido son claras, se puede interrelacionar el estado del rodamiento dañado con alguna de las causas previstas anteriormente lo que posibilita la prevención de la reincidencia de ocurridos semejantes

2.3.3.2 Fallas en el devanado del estator

La mayoría de fallas eléctricas que se presenta en un motor están relacionadas con los daños en el estator, que se producen por el deterioro de su aislamiento. Esta falla produce calentamiento, sobretensiones, movimiento de las bobinas, corrientes elevadas, todo esto puede dar como resultados cortocircuitos entre devanados de diferentes fases o entre los devanados y tierra. Las causas más típicas por las que falla el devanado del estator son las siguientes:

- **Sobrecarga.** - Los devanados en un motor eléctrico pueden fallar debido al exceso de carga en el eje del motor. Esto provoca que la temperatura en el devanado se incremente pudiendo producir una falla. Para ello resulta recomendable incorporar una protección térmica y un termistor para poder prevenir alguna falla. Un relé de sobrecarga térmica es un método de protección común.
- **Corto entre espiras.** - El corto entre espiras se puede producir por las causas como la existencia de una contaminación interna que produzca la del esmalte de aislamiento del hilo, también lo pudieran producir unas rápidas oscilaciones en la tensión alimentación.



FIGURA 10. Cortocircuito entre espiras. [7]

- **Corto entre fases.** – Aunque la contaminación del interior del motor puede facilitar a que se produzca también un corto entre fases, otra causa habitual se puede producir por una degradación del material aislante por resecado debido al exceso de temperatura

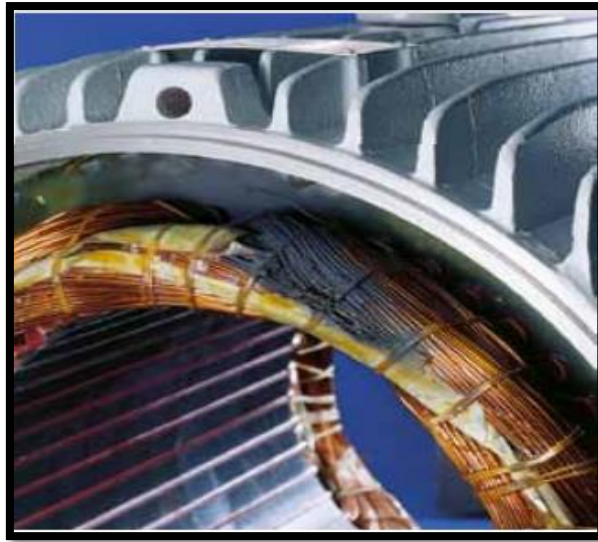


FIGURA 11. Cortocircuito entre fases. [7]

- **Corto en la conexión.** – La causa más común de este tipo de fallo se debe a la existencia de un mal contacto en los terminales, esta también se podría dar por una falla en el material aislante y contaminación interna del motor.



FIGURA 12. Corto en la conexión. [7]

- **Corto en la ranura.** – Se da por fallo en el material aislante entre la ranura e hilo, falla del barniz de impregnación, contaminación interna del motor como resecado del aislante por el exceso de temperatura.



FIGURA 13. Cortocircuito en la ranura [7]

- **Desequilibrio de tensión.** - Puede producirse por el desequilibrio de la tensión entre fases, desequilibrio de corriente o ambas. También se suele originar por la existencia de malas conexiones ya sea en el contactor, disyuntor, interruptor o a su vez un fallo en los condensadores.

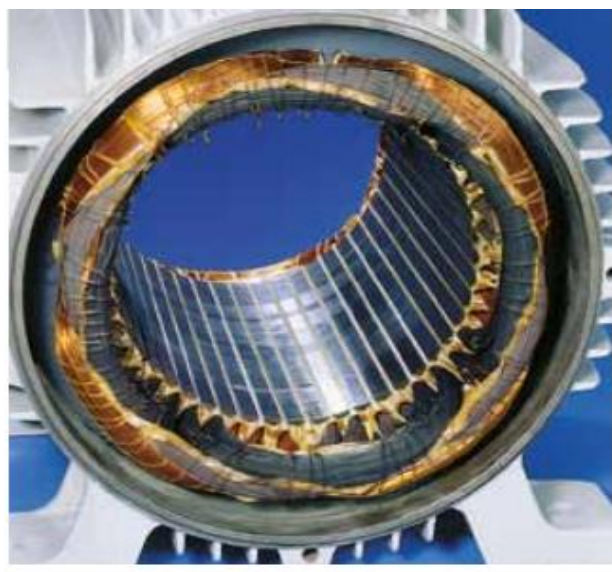


FIGURA 14. Desequilibrio de tensión [7]

- **Rotor bloqueado.** – Muchas veces se debe a una excesiva dificultad de arranque la cual puede ser originaria por una brusca caída de tensión, elevada inercia o par de carga muy alto. También se suele originar por una oscilación de tensión en las tres fases.



FIGURA 15. Rotor bloqueado. [7]

- **Sobrecalentamiento.** - Esto se puede dar por exceso de carga en el eje, una incorrecta conexión de los terminales de alimentación, sobretensión o subtensión existente en la red de alimentación, o un sistema de refrigeración deficiente.



FIGURA 16. Sobrecalentamiento. [7]

- **Fallo de fase.** – Generalmente se suele dar por rotura de un cable de alimentación, aunque también puede ser ocasionada por la quema de una fase en el transformador de alimentación., fallo de un fusible que deja deshabilitada una fase, o un mal to en las conexiones ya sea contactor, disyuntor, transformador etc.

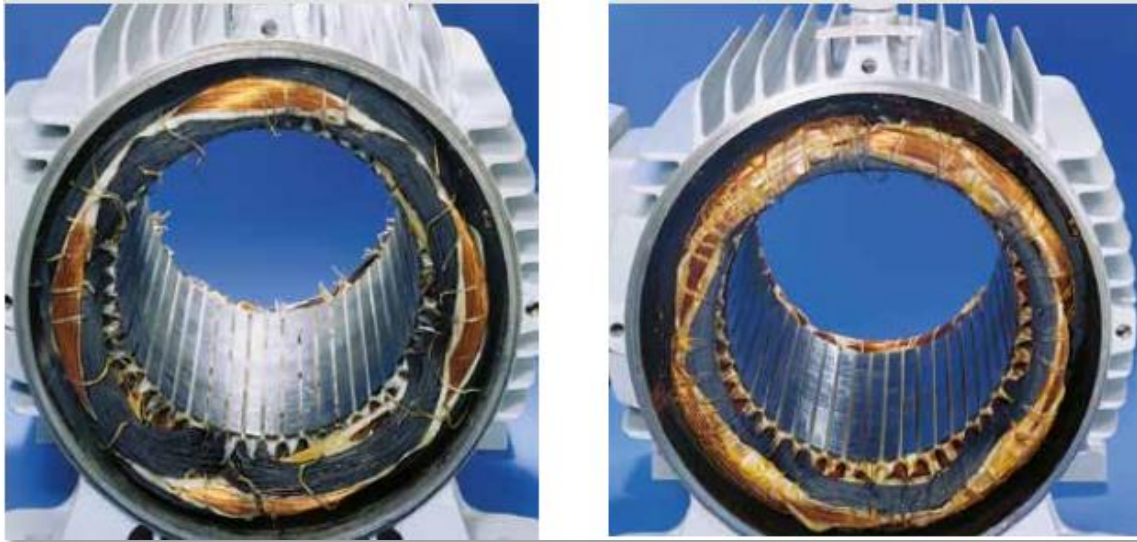


FIGURA 17. Fallo en fase conexión en estrella y triángulo. [7]

2.3.3.3 Factores externos

Un gran porcentaje de fallos en los motores eléctricos son producto de la severidad de las condiciones de trabajo como el ambiente hostil que los rodea, estas pueden derivar en pérdidas de propiedades físicas o químicas de los elementos presentes en el motor. De igual forma en ciertas circunstancias, especialmente cuando existe la combinación de agua, electricidad y sales necesarias presentes en el suelo, se puede poner en peligro la integridad como seguridad de la vida humana, ocasionando grandes repercusiones sociales y económicas para la empresa. Entre los factores externos más perjudiciales podemos encontrar:

- **La humedad del medioambiente.** - Una elevada humedad en el ambiente puede permitir que esta llegue a filtrarse en las partes internas del motor y causar no daños eléctricos o mecánicos sino, puede producir corrosión de algunos elementos, como el crecimiento de algunos organismos que provoque el deterioro prematuro del motor eléctrico. Una posible solución para este tipo de problema, es la instalación de

calefactores anti condensación en especial cuando los motores son usados al aire libre en la época de invierno, también se podría utilizar pinturas protectoras, tapones en los orificios que dificulte el ingreso de humedad.

- **Contaminación.** – La penetración de cuerpos extraños en el interior de motores eléctricos puede causar daños en los rodamientos, cojinetes o en los devanados del rotor como estator, es recomendable que si el motor está trabajando en un ambiente hostil cerciorarse que el grado I.P. es el adecuado para no tener problemas a futuro. Para minimizar la entrada de cuerpos extraños se puede recurrir a la utilización de sellos laberintos o sellos radiales en los rodamientos, para dificultar el ingreso en los devanados se puede optar por un grado más elevado del I.P. del motor eléctrico.
- **Temperatura ambiental-** Por lo general los motores eléctricos se diseñan para trabajar a una temperatura ambiente de 40⁰C y una altitud máxima de 1000 metros desde el nivel del mar. A diferentes temperaturas de trabajo como alturas la potencia nominal de salida permitida será como máxima la otorgada por la tabla 2, de superarse estos valores estaríamos acortando la vida útil de nuestro motor debido a que existe un mayor deterioro del aislamiento de los devanados los cuales están diseñados para soportar una cierta temperatura máxima según la clase de aislamiento que posean. La capacidad de conducción es a menudo necesaria para las temperaturas ambientales mientras que para bajas temperaturas ambientales es necesario recurrir a materiales especiales.

Tabla 2. potencia nominal de salida para distintas temperaturas y alturas de trabajo.

Temperatura ambiente en °C	30	40	45	50	55	60	70	80
Porcentaje de relación de salida	107	10	96.5	93	90	86.5	79	70
Altura sobre el nivel del mar en m	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	
Porcentaje de relación de salida	100	96	92	88	84	80	76	

2.4.3.4 Fallas en el rotor

En regímenes transitorios especial mente en el arranque, debido a la alta intensidad que circula los motores suelen elevar rápidamente su temperatura como fuerza centrífuga un elevado aumento de ambos factores suele provocar por lo general fallos en los rotores especialmente en los de “jaula de ardilla”.

Se distinguen dos momentos críticos en la vida del motor, que influirán negativamente en la integridad del rotor, esto son: El arranque y la sobrecarga momentánea. Sin embargo, algunos problemas pueden originarse desde el proceso de fabricación por defectos en la fundición, en el caso de rotores de aluminio por juntas defectuosas de los anillos de corto circuito soldados a las barras. Los puntos donde se ubican los defectos generan puntos de alta temperatura por elevada resistencia eléctrica. [8].

- **Excesiva frecuencia de arranque.** - El calentamiento, enfriamiento, aceleración y desaceleración muy continua puede provocar esfuerzo térmico o fracturas por inercia El tiempo de arranque es una función del par de carga, la inercia y el par motor. La corriente de arranque es muy elevada con respecto a la corriente nominal, un tiempo de arranque muy largo elevaría mucho la temperatura del motor pudiéndole causar daños perjudiciales. El tiempo máximo de arranque debe ser el recomendado por el fabricante suele rondar desde los 25 a 90 segundos dependiendo del tamaño del motor y número de polos. Cuando un motor se somete a arranques frecuentes, no puede ser cargado con su salida nominal debido a las pérdidas térmicas de partida en los devanados.
- **Barras rotas o en mal estado.** – El proceso de barras rotas puede ser originado por dos motivos, el primero puede surgir durante la construcción del rotor en el que las barras internamente presentan porosidades, la segunda se debe a que el motor durante su funcionamiento es sometido a una serie de arranques directos o indirectos con alta carga, que produce un sobrecalentamiento y expansión térmica de los materiales [5]. Si se encendiera un motor con una de las barras rotas, se generaría un calor excesivo alrededor de la vecindad de dicha barra rota. Esto puede propagarse a otras barras del rotor y destruir el aislante

alrededor de las placas o laminaciones. El calor intenso generado por la barra rota del rotor también puede afectar al aislante del estator provocando su fallo ya que se encuentra solamente a pocos milímetros.



FIGURA 18. Motor con barra rota. [9]

- **Sobrecarga.** - Debido a la elevada inercia que presentaría un motor excesivamente cargado cuando se encuentra en reposo, provocaría una subida repentina y excesiva de temperatura, pudiendo provocar falla en la jaula del rotor, estos sucesos por lo general se producen en el arranque combinado con una refrigeración deficiente y altas corrientes. Esta sobrecarga solo corresponde a la carga que se le aplica al motor también podría ser originada por atascos mecánicos internos, fallos en rodamientos o algún elemento extraño
- **Baja tensión.** - Provoca el calentamiento y reduce la eficiencia del motor provocando finalmente la se debe a una conexión errónea, mal contacto o problemas con el transformador.

2.4.3.4 Acoplamiento del eje

Los motivos por el cual el motor eléctrico puede fallar a causa del eje, son por una mala alineación y mala instalación. Por lo general suele suceder una mala alineación. Como el alineamiento se realiza frecuentemente antes de entrar la máquina en servicio, (máquinas detenidas), ocurren algunos casos que la posición de los ejes se modifica cuando ellas entran en funcionamiento.

- **Mala alineación.** - Se dice que dos máquinas se encuentran desalineadas si la posición de sus ejes en operación no son colineales. El desalineamiento de

ejes en máquinas acopladas es una de las principales causas de vibraciones en las máquinas rotatorias. Un acoplamiento que está mal alineado sufre esfuerzo, estrés y puede conducir al fracaso. Existen tres tipos de alineación paralela y angular, aunque por lo general se suele tener una combinación de ambas. [6]

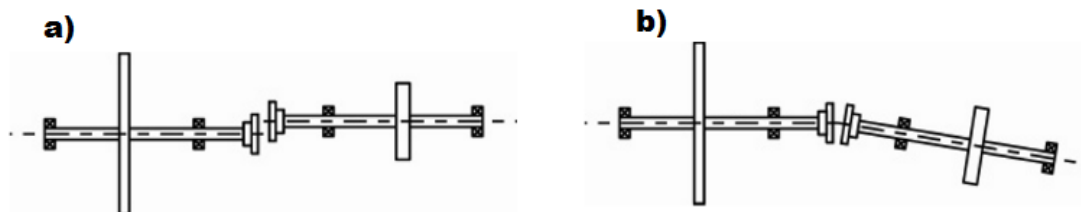


FIGURA 19. Desalineación a) paralela b) angular [10]

- **Mala instalación.** – Un montaje incorrecto del acoplamiento provocara su fallo. Existen dos tipos de acoplamiento, por lo general los acoplamientos rígidos se usan cuando los ejes están alineados coaxialmente, el acoplamiento flexible se usa cuando no se puede garantizar que la alineación del eje sea correcta o se espera que pudiera haber una distorsión o movimiento que se pudiera transmitir al eje.

2.4 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS

2.4.1 Métodos Off-Line.

Los métodos offline se basan en la determinación de un gran número de parámetros característicos máquina para conocer el estado en el cual se encuentra. Como su nombre indica los métodos offline, requiere que la máquina se encuentre fuera de funcionamiento para poder efectuar sobre ella alguna medición, por lo tanto, estas técnicas son aplicables siempre y cuando se haya planeado una parada para mantenimiento, cuando se haya detenido la máquina por alguna reparación, de otra manera podría acarrear grandes consecuencias económicas, productivas y de gestión para la empresa.

Algunas de estas técnicas pueden ser de tipo invasivas, ya que requieren sensores que necesitan ser implantados y adecuados en una máquina eléctrica para realizar la medida de alguna magnitud, que tras su comparación y análisis permitirá establecer su estado.

El análisis de la temperatura, es una técnica que puede ser invasiva o no según la fiabilidad que se quiera obtener de los datos adquiridos, aunque actual existen algunos modelos y ecuaciones que permiten medir la temperatura de manera no intrusiva u online no reproducen exactamente la realidad ya que intervienen muchos factores que podrían distorsionar la lectura. La mejor opción es utilizar un sensor, el cual se lo suele colocar en las bobinas de los devanados o en los aislantes de la máquina para obtener una medida fiable de lo que está ocurriendo en el interior de nuestra máquina eléctrica.

Tradicionalmente en los ensayos offline se han empleado técnicas tales como la medición de la tangente del ángulo delta, la medición del índice de polarización o la medición de la resistencia de aislamiento por medio de un mega-óhmetro para determinar las propiedades dieléctricas de los aislantes de los devanados de máquinas eléctricas [11]

En la actualidad se ha hecho común el empleo de la prueba de impulsos, la cual consiste en aplicar pulsos de alta tensión a los devanados de una máquina y analizar su respuesta transitoria. Así se pueden detectar los fallos cuando aparecen diferencias en la señal de onda entre las bobinas.

Por lo general los fallos en los devanados se inician por cortocircuito entre espiras al fallar el aislamiento, estos cortocircuitos generan puntos calientes que degradan el material no conductor que protegen a la bobina provocando su ruptura parcial o total. Estos problemas suelen tomar mucho tiempo en surgir por lo que las técnicas tradicionales no podrían detectar su falla a tiempo hasta que no se produzca un fallo grave.

La prueba de comparación de pulsos detecta defectos de aislamiento entre espira y espira, bobina y bobina, o entre fase y fase. Esta técnica resulta más eficaz frente a las demás técnicas ya que detecta las anomalías que son muy difíciles de reconocer a través de las técnicas anteriores [12].

Las técnicas mencionadas y algunas que se han omitido por estar en desuso, resultan muy efectivas, permitiendo determinar el estado aislante de la máquina y estimar su vida útil restante. Entre las debilidades de la técnica se encuentra en que se necesita que la máquina eléctrica se encuentre fuera de funcionamiento aparte de lo intrusivas que resultan algunas de ellas.

2.4.2 Termografía.

Todos los cuerpos por encima del cero absoluto (-273°C) emiten radiación infrarroja (calor). En general, cuanto mayor es la radiación emitida, mayor es la temperatura del cuerpo y menor su longitud de onda. Esta radiación es invisible al ojo humano y su rango en el espectro electromagnético se sitúa entre la luz visible y la radiación de microondas. En concreto, la longitud de onda de los infrarrojos se sitúa entre las 0,7 y las 1000 micras ver figura 20. [13]

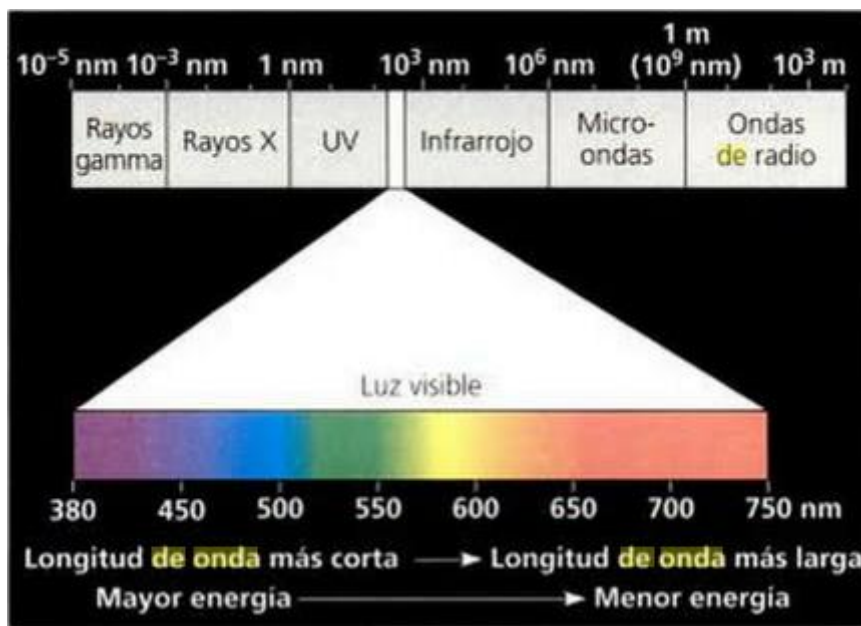


FIGURA 20. Longitudes de onda [14]

Para entender cómo funciona la cámara termografía es necesario conocer algunos fundamentos de la radiación térmica, entre los que podemos recalcar la ley de Kirchhoff, la ley de Stefan – Boltzman, la Ley de Wien y Ley de Planck.

Kirchhoff establece la emisividad y la absorbitividad de un material cualquiera en equilibrio termodinámico son iguales. Como el seno del cuerpo emite y absorbe radiación térmica, la única manera de que el equilibrio termodinámico sea posible a una temperatura arbitraria es que cada partícula emita tanta radiación como absorbe, con lo que la emisividad tiene que igualar a la absorbitividad. [15]

La radiación emitida por un cuerpo no debe confundirse con la radiación reflejada por el mismo y que lo hace visible. Una persona es esencialmente visible por la luz que refleja y no por la radiación que emite (radiación infrarroja). [16] Al mismo tiempo, todo cuerpo, cualquiera sea su naturaleza, absorbe parte de la radiación

electromagnética que sobre él incide. Precisamente, se denomina poder absorbente de un cuerpo al cociente entre la radiación absorbida y el incidente sobre el cuerpo. El poder absorbente varía entre cero y uno; es la unidad si el cuerpo absorbe totalmente la radiación que sobre él incide, sin reflejar ni transmitir nada. En ese caso el cuerpo se denomina cuerpo negro o radiador ideal. Obviamente que no existen en la naturaleza cuerpos con las características del cuerpo negro.

Hemos dicho que todo cuerpo emite y absorbe radiación. Ambas propiedades, emisión y absorción, dependen de la longitud de onda y de la temperatura del cuerpo. Esta relación es igual al poder emisivo del cuerpo negro para dicha longitud de onda (λ) y de la temperatura (T). Es decir que si $\epsilon_1(\lambda, t), \epsilon_2(\lambda, t), \dots, \epsilon_n(\lambda, t)$ representan los poderes emisivos de varios cuerpos y $A_1(\lambda, t), A_2(\lambda, t), \dots, A_n(\lambda, t)$ sus correspondientes poderes absorbentes, dando a λ y a T un valor fijo y único para todos los cuerpos y llamando $\epsilon_0(\lambda, t)$ y $A_0(\lambda, t)$ a los correspondientes valores del cuerpo negro[11]

$$\frac{\epsilon_1(\lambda, t)}{A_1(\lambda, t)} = \frac{\epsilon_2(\lambda, t)}{A_2(\lambda, t)} = \dots = \frac{\epsilon_n(\lambda, t)}{A_n(\lambda, t)} = \frac{\epsilon_0(\lambda, t)}{A_0(\lambda, t)} = \epsilon_0(\lambda, t) \quad (2.1)$$

La cual puede escribirse:

$$\epsilon(\lambda, t) = \epsilon_0(\lambda, t) * A(\lambda, t) \quad (2.2)$$

En otras palabras, cada cuerpo, independientemente de su forma, densidad, tamaño o composición química, tiene el poder de absorción máximo para la radiación que tiende a emitir y la emisión de energía depende sólo de longitud de onda (λ) y de la temperatura (T). Es conveniente reiterar que la mencionada ley de Kirchhoff es válida en condiciones de equilibrio termodinámico.

Stefan – Boltzmann establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m²) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$E = \sigma * T^4 \quad (2.3)$$

Donde 'T' es la temperatura efectiva, es decir, la temperatura absoluta de la superficie y 'σ' es la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^2}$ Esta potencia emisiva de un cuerpo negro (o radiador ideal) supone un límite superior para la potencia emitida por los cuerpos reales.

La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (2.4)$$

Donde épsilon (ε) es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende marcadamente del material de la superficie y de su acabado, de la longitud de onda, y de la temperatura de la superficie.

Wien expresa de manera cuantitativa el hecho empírico mediante el cual el pico o máximo de emisión en el espectro de un cuerpo negro se desplaza hacia longitudes de onda más cortas (frecuencias mayores) a medida que aumenta la temperatura. Especifica que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura:

$$\lambda_{max} = \frac{0.002898 \text{ m} \cdot \text{K}}{T} \quad (2.5)$$

donde T es la temperatura del cuerpo negro en Kelvin (K) y λ_{max} es la longitud de onda del pico de emisión en metros. Las consecuencias de la ley de Wien es que cuanto mayor sea la temperatura de un cuerpo negro menor es la longitud de onda en la cual emite. Por ejemplo, la temperatura de la fotosfera solar es de 5780 K y el pico de emisión se produce a 500 nanómetros (5×10^{-7} metros). Esta longitud de onda corresponde aproximadamente al centro del espectro visible siendo por lo tanto un tono de verde. Sin embargo, debido a la difusión de Rayleigh de la luz azul por la atmósfera la componente azul se separa distribuyéndose por la bóveda celeste y el Sol aparece amarillento. [17]

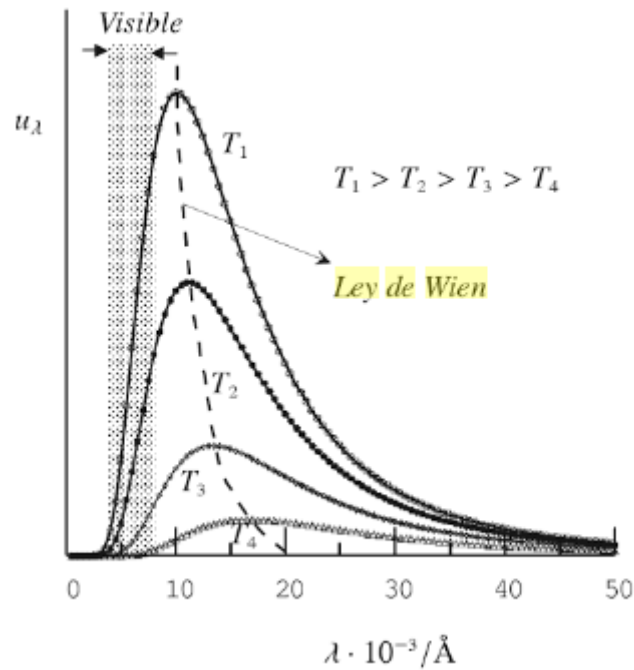


FIGURA 21. Ley de desplazamiento de Wien [18]

Planck establece que no todas las superficies emiten o absorben la misma cantidad de energía radiante cuando se calientan a la misma temperatura. Un cuerpo que absorba o emita a una temperatura determinada la máxima cantidad de energía posible se denomina superficie negra o simplemente cuerpo negro. Un cuerpo negro perfecto no existe en la realidad, sino que es un ente ideal que se utiliza como referencia respecto a otros cuerpos radiantes. No obstante, existen numerosas superficies que son cuerpos negros casi perfectos, sobre todo para radiaciones de onda larga, por lo que para casos prácticos son considerados como tales con suficiente exactitud. [19]

Cuando un cuerpo negro se calienta a una temperatura absoluta, T , su superficie emite un flujo de radiación térmica con una distribución espectral definida, que es determinable mediante la Ley de Planck:

$$Q_{0\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 * (e^{\frac{c_2}{\lambda * T}} - 1)} \quad (2.6)$$

Donde $Q_{0\lambda}$ es el poder emisor espectral en función de la longitud de la longitud de onda, T la temperatura en grados kelvin, $C_1=3.4718*10^{-16}$ [W*m2] y $C_2=1.4388*10^{-2}$ [W*m2] son constantes de radiación y λ la longitud de onda.

2.4.2.1 CAMARA TERMOGRÁFICA

La cámara termografía se basa en función de las leyes descritas con anterioridad para darnos una imagen digital en de la radiación térmica emitida por un cuerpo.

La cámara de termografía dispone de un sensor térmico llamado microbolómetro que al recibir la radiación infrarroja se calienta y cambia su resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia se mide y se equipará a una determinada temperatura, siendo asignado un color para cada temperatura y formando una imagen coloreada que será la que veamos en pantalla. La ventaja de estos sensores es que pueden trabajar a temperatura ambiente y no necesitan refrigeración, por lo que son más económicos que los de uso militar.

La energía de infrarrojos (A) que irradia un objeto se enfoca con el sistema óptico (B) sobre un detector de infrarrojos (C). El detector envía los datos al sensor electrónico (D) para procesar la imagen. Y el sensor traduce los datos en una imagen (E), compatible con el visor y visualizable en un monitor de vídeo estándar o una pantalla LCD. figura 20.

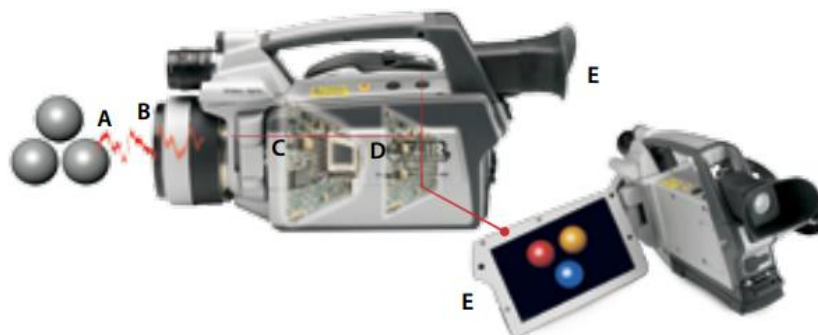


FIGURA 22. partes de na cámara termografía [20]

Cuando se realiza una termografía, básicamente siempre se debe medir en un punto del que conozcamos su emisividad. Prácticamente la totalidad de las sustancias orgánicas, pinturas, recubrimientos, papeles, plásticos, minerales, etc. se pueden medir sin dificultades con una cámara termografía. La emisividad de todos estos materiales es más o menos del 0.95 y además no depende de la temperatura. [21]

Por el contrario, los metales con superficies pulidas y brillantes o con estructuras cambiantes son más difíciles de medir. Normalmente, su emisividad es baja y se ve alterada si la temperatura de los objetos medidos también cambia.

Para realizar una correcta medición con una cámara de termografía se debe considerar en que ángulo se realiza la media, su rugosidad, si existe una radiación reflejada, la radiación emitida por la atmosfera, su emisividad direccional, la distancia en que se realiza la lectura, la contaminación del ambiente, etc. En el caso que se desconozca la emisividad del objeto se puede recurrir a aplicar algún tipo de recubrimiento, como pintura o cinta adhesiva de emisividad. También se podría recurrir a un termómetro de contacto y compararlo con el resultado de la cámara con una emisividad en 1 y ajustar esta hasta que los valores concuerden. El color del material no influye notablemente en la radiación infrarroja emitida por el objeto medido sin embargo en la distancia entre el objeto y la temperatura ambiente en la que se realiza la medición se debería poner un límite. Esta depende solo de la temperatura y no del color de la superficie del objeto.

Los fallos en el motor, como, los signos de desgaste en el contacto de las escobillas, los cortocircuitos en los armazones, cortocircuitos en el estator, estado de la jaula de ardilla suelen producir un calor excesivo antes del fallo, y son difícil mente detectables mediante otros métodos como el análisis de vibraciones puesto que la frecuencia que generan es poca o ninguna ver figura 23. La termografía ofrece una visión completa y permite comparar las temperaturas el estado de un motor con respecto a uno similar ya que se puede tener una visión global de varios elementos a la vez.

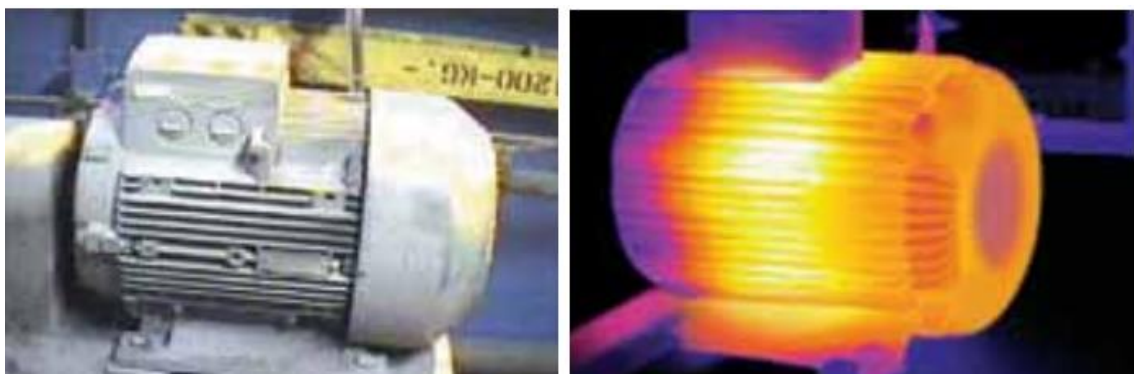


FIGURA 23. Motor con problema del bobinado interno [20]

2.4.3 Análisis de vibraciones

El estudio de las vibraciones mecánicas es una rama de la mecánica, y por lo tanto de la ciencia que estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos, sistemas y de las fuerzas asociadas.

La vibración es el movimiento oscilatorio o de vaivén de la máquina o un elemento perteneciente a ella, este movimiento puede ser en cualquier dirección partiendo desde su posición de equilibrio.

Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, etc [22]

Existen dos tipos generales de vibraciones, las libre y forzadas. La vibración libre ocurre cuando un sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al mismo sistema, es decir cuando no interviene ninguna fuerza externa. Por el contrario, en vibraciones forzadas existe una fuerza de excitación externa no perteneciente al sistema.

La ecuación diferencial que describe un movimiento libre amortiguado en el que tanto la amplitud como la energía mecánica disminuyen con el tiempo se encuentra descrita por la ecuación 2.7 donde $m\ddot{x}$ es la fuerza de inercia $c\dot{x}$ 'la fuerza amortiguadora y kx la fuerza elástica.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx=0 \quad (2.7)$$

La ecuación diferencial que describe el movimiento forzado amortiguado viene dada por la ecuación 2.8 en donde $F_0 \cos(\omega * t)$ es la fuerza excitadora

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos(\omega * t) \quad (2.8)$$

Medir la vibración supone la medida de la aceleración, velocidad o desplazamiento de un movimiento en una dirección determinada, que son funciones del tiempo. Para poder caracterizar estas magnitudes $y(t)$, se puede recurrir al valor pico-pico, valor medio, valor eficaz o kurtosis.

El **valor pico** (V_p) de una señal periódica se denomina al máximo valor instantáneo que alcanza una señal. El valor **pico-pico**, es la amplitud neta de la onda desde el pico negativo hasta el pico positivo, es decir la suma de los valores pico absolutos. Ver figura 24.

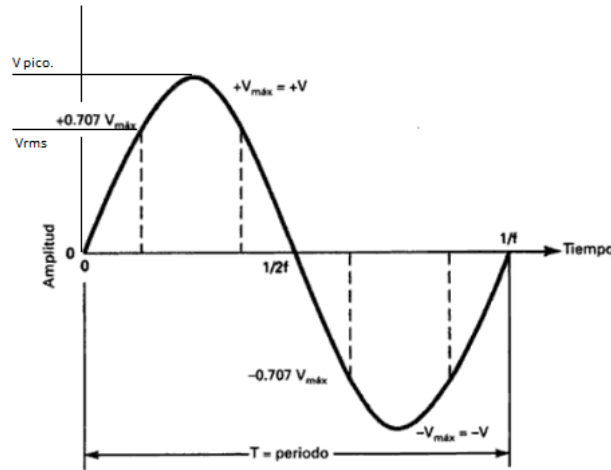


FIGURA 24. Características de una onda. [23]

El **valor medio** en una señal periódica es el promedio de todos los valores de la señal en un periodo (T) y viene expresada por la ecuación 2.9

$$y_m = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| dt \quad (2.9)$$

El **valor eficaz (RMS)** es la media cuadrática de los valores instantáneos durante un periodo completo. viene expresado por la ecuación 2.10

$$y_m = \sqrt{\frac{1}{T_{i+1} - T_i} \int_{T_i}^{T_{i+1}} y^2(t) dt} \quad (2.10)$$

Kurtosis, es la medida del aspecto de la señal, es decir la relación entre la cantidad de picos de la señal con respecto a su valor cuadrático medio, esta es empleada en el control de rodamientos.

$$C_k = \frac{n \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^4}{[\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2]^2} \quad (2.11)$$

Suele considerarse que una alta amplitud en la vibración, implica un mal funcionamiento, ello ha llevado a diversos estudios que tratan de establecer un nivel

máximo de amplitud que debería alcanzarse para considerarse un fallo, pero en realidad no existe un límite universal de severidad de vibración. La variación de la amplitud de una vibración a determinada frecuencia no modifica considerablemente el resultado del valor medio, como para determinar que se está produciendo un fallo, es por ello que se debe analizar el espectro de frecuencia ver figura 25, con la finalidad de encontrar alguna anomalía en el funcionamiento, ya que los componentes deteriorados producen vibraciones con frecuencias características.

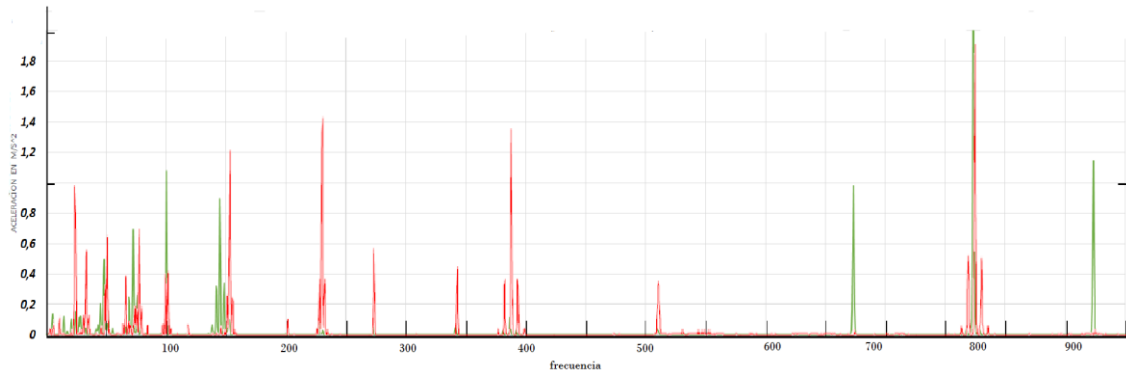


FIGURA 25. Espectro de frecuencia.

Las medidas de vibraciones suelen realizarse en la carcasa de la máquina, por tal motivo estas dependen directamente de las características que posea este elemento, como su rigidez, amortiguamiento, etc. Por lo establecido límites y adecuarlos a cualquier máquina puede llevarnos a su deterioro prematura. En tal caso se debería llevar un registro del nivel de vibraciones a lo largo del tiempo y bajo diferentes modos de trabajo para poder establecer cuando una vibración se encuentra fuera de un límite.

Existen tablas de severidad de vibración establecidas por la norma ISO, que solo se deben emplear de manera orientativa para conocer el nivel que se esperaría de vibración en función del estado de una máquina.

En la actualidad, el procesamiento de las señales obtenidas en la medida de vibraciones se lo realiza de forma digital, es decir, se muestrea una señal temporal en una serie de instantes consecutivos de tiempo y estos datos se procesan digitalmente para obtener las características de la señal medida. Ver figura 26.

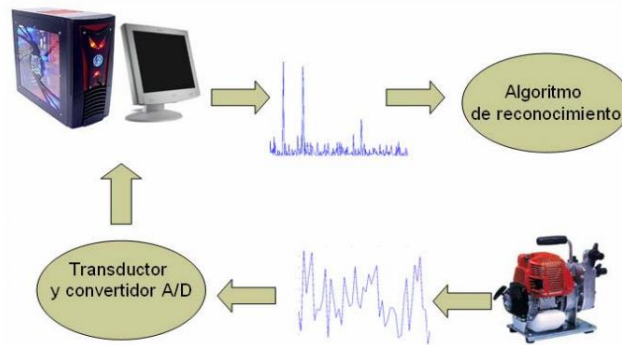


FIGURA 26. Procesamiento de la señal de vibración de una máquina [24]

En vibraciones, gran parte del análisis de la señal se realiza en el dominio de frecuencias, por medio de la transformada de Fourier de señales temporales. Si la señal periódica, de periodo $T = 2\pi/\omega_1$ puede descomponerse en la suma de senos y cosenos mediante el desarrollo de las series de Fourier:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cos \omega_p t + \sum_{p=1}^{\infty} b_p \sin \omega_p t$$

$$a_p = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \omega_p t dt$$

$$b_p = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \omega_p t dt$$
(2.12)

Que contiene el término constante $a_0/2$ y los armónicos asociados con las frecuencias $\omega_p = p\omega_1$. Cuando se analiza una señal hay que considerar que solo se analiza una parte de la señal, es decir dispondremos de una señal de longitud finita. En segundo lugar, cuando se digitaliza, lo que hacemos es muestrear la señal en una secuencia de instantes de tiempo. Como consecuencia la señal real de la obtenida de la transformada de Fourier por lo que se debe tomar las precauciones necesarias para que estas diferencias sean mínimas.

Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos, como son: desequilibrio de elementos rotativos; desalineación en acoplamientos; engranajes desgastados o dañados; rodamientos deteriorados, etc. Aunque también se puede detectar algunos problemas eléctricos entre los cuales podemos mencionar al

cortocircuito en los devanados del estator entre espiras o entre bobinas de la misma fase además se puede detectar el aumento de resistencia o rotura de una barra del rotor.

La mayoría de fallas mecánicas y algunas eléctricas producen una frecuencia característica que delata que el equipo se encuentra en mal funcionamiento, que por lo general va relacionada con la frecuencia de rotación de la maquia eléctrica.

Por ejemplo, un problema en el rotor como la rotura de barras en un motor de jaula de ardillas, o el aumento de la resistencia eléctrica en una parra puede originar las siguientes frecuencias de vibración:

-Aumento de la vibración a la velocidad de giro (f_g) y de sus armónicos superiores junto con las bandas laterales espaciadas un incremento de frecuencia iguala la frecuencia de paso de los polos f_{pp}

$$f_{pp} = 2 * s * f_{red} = 2 * p * (f_s - f_g) \quad (2.13)$$

Donde 's' es del deslizamiento que posee las máquinas de inducción, en las cuales la velocidad de giro es inferior a la frecuencia de sincronismo (f_s). La frecuencia de sincronismos e obtiene al dividir la frecuencia de red (f_{red}) que suele tener un valor de 50 o 60 Hz para el número de polos 'p' que posea el motor eléctrico.

- Aparece una frecuencia a $2 * f_{red}$ con bandas espaciadas a la frecuencia de paso de los f_{pp} .

-Aumento en la amplitud a la frecuencia de paso de barras del rotor f_{pb} con bandas laterales espaciadas al doble de la frecuencia de red $2 * f_{red}$.

$$f_{pb} = (N_b * f_g) \quad (2.14)$$

Donde N_b es el número de barras que posee el rotor, es un múltiplo par del número de polos y usualmente se encuentra entre 30 y 40.

-En el estator en dirección axial puede aparecer vibración a seis veces la frecuencia de giro junto con bandas laterales espaciadas f_{pp} .

En la figura 27 se muestra el caso de un motor con un problema de aumento en la amplitud de la frecuencia de paso de las barras del rotor.

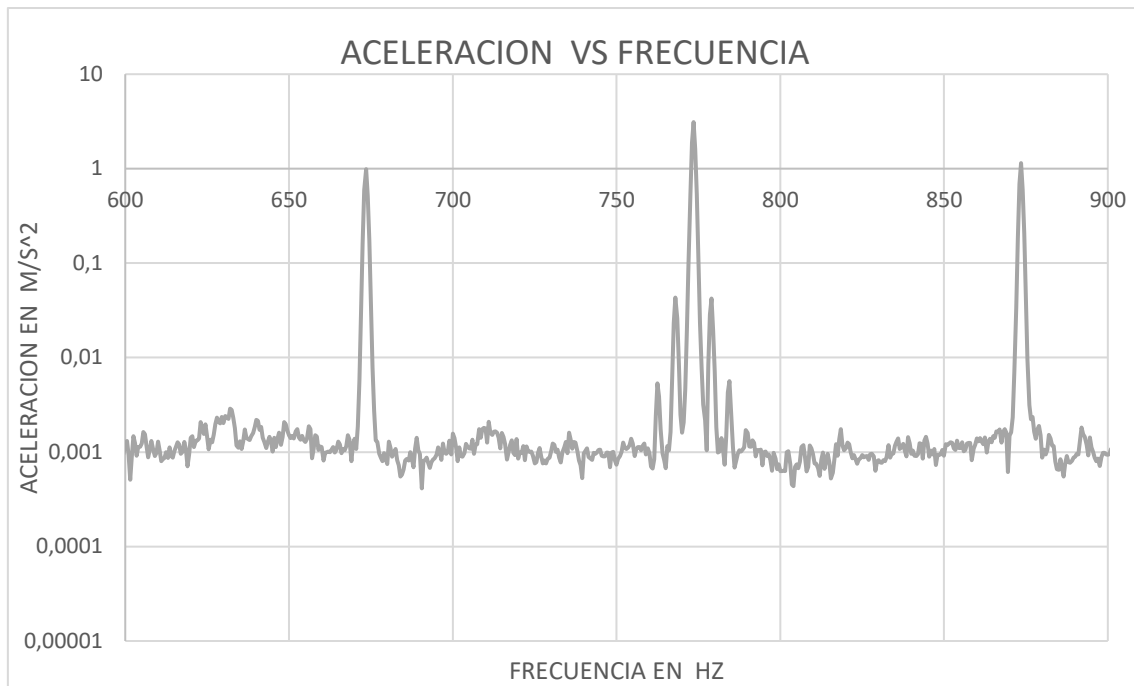


FIGURA 27. Aumento de la amplitud de la frecuencia de paso Fpb. de las barras del rotor.

2.4.4 Análisis espectral de corrientes del estator

Se conoce que la corriente de alimentación de la máquina eléctrica es una de las magnitudes que contiene más información sobre el estado de la misma. Así, por tanto, está siendo la magnitud más utilizada, para posteriormente tratarla con técnicas de señal adecuadas que nos permitan detectar y diagnosticar posibles fallos en la misma. [25]

La técnica de análisis de corrientes del estator se basa en que cualquier agente que afecte el campo magnético en el entrehierro de un motor se verá reflejado en componentes de frecuencia características en el espectro de las corrientes del estator. De esta forma, una falla en barras de rotor o en la pista de un rodamiento causará cambios en la densidad de flujo magnético a través del entrehierro. Esto a su vez ocasionará la aparición de componentes de frecuencia características en el espectro de corrientes del estator. Estas componentes de frecuencia están relacionadas con posibles defectos por modelos matemáticos basados en teoría general de máquinas eléctricas y dependen básicamente de la frecuencia de suministro de corriente, la velocidad del motor y su configuración (dimensiones del rodamiento, número de bolas, número de polos). La corriente estática de una fase de una máquina eléctrica sana posee una ecuación similar a:

$$i_A(t) = \sqrt{2} * I_l * \cos(\omega * t - \varphi - \frac{\pi}{6}) \quad (2.15)$$

Donde φ es el factor de potencia y ω es la frecuencia en radianes por segundo. Cuando una máquina sufre una anomalía lo que se produce es la modulación de la corriente estatórica descrita por la ecuación 2.16 donde m es el índice de modulación y ω_0 es la frecuencia característica de la falla

$$I_A(t) = i_A(t)(1 + m * \cos(\omega_0 * t)) \quad (2.16)$$

La gran ventaja del análisis de espectro de corrientes para motores es que se realiza con el motor trifásico en marcha tomando la lectura de la corriente en una de las fases.

Esta técnica es similar al análisis de vibración ya que ambas usan un espectro, o una gráfica de amplitud VS frecuencia, obtenida del procesamiento de la señal, valiéndose de la transformada de Fourier. Mientras en el análisis de vibraciones generalmente se usa un acelerómetro para captar las vibraciones en la carcasa del motor, en el análisis de corriente es necesario emplear una piza amperimétrica que se colocara en una de las fases del estator. Ver figura 28

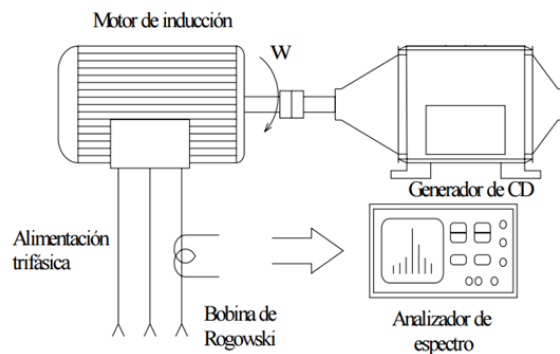


FIGURA 28. Esquema de realización del análisis de corriente [26]

El método de análisis de corriente del estator presenta una ventaja económica frente al análisis de vibraciones, debido a que, la pinza amperimétrica puede ser usada en varias máquinas, mientras que los transductores de vibración se los suele colocar por lo general de forma fija a la máquina lo que implica una mayor inversión.

Este método ha sido muchas de las veces utilizado para diagnostica con éxito los problemas relacionados con la falla de las barras rotóricas de un motor de jaula de ardilla cuya frecuencia de fallo vine descrita por:

$$f_{pb} = \left[m \left(\frac{1-s}{\frac{p}{2}} \right) \pm s \right] \quad (2.17)$$

Donde ‘m=1, 2, 3, 4, 5’ es el número de armónico, ‘p’ el número de polos y ‘s’ es el deslizamiento que posee el motor. En la figura 29, podemos observar un fallo de este tipo. Aunque los métodos clásicos se centran en la obtención de armónicos alrededor de la frecuencia de red

$$f_{pb} = f_{red}(1 + 2s) \quad (2.18)$$

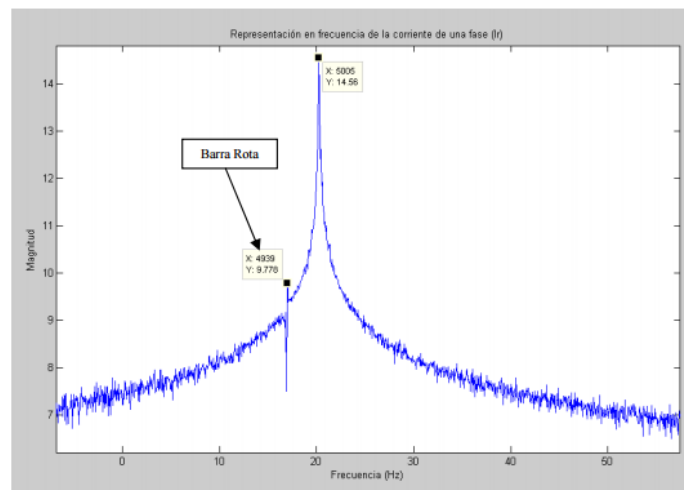


FIGURA 29. Frecuencia de la corriente de una fase de un motor eléctrico, con barra rota. [25]

De igual manera ha resultado útil a la hora de detectar si se encuentra una espira cortocircuitada, por la presencia de armónicos basados en las ecuaciones 2.20 y 2.21 para bajas y altas frecuencias respectivamente.

$$f_{cort} = f_{red} \left(k \pm m * \frac{1-s}{p} \right) \quad (2.20)$$

$$f_{cort} = f_{red} \left[1 \pm m * Z_0 \frac{(1-s)}{p} \right] \quad (2.21)$$

Donde k es una constante que puede adquirir valores de impaes 0,1,3,5 y Z_0 es el número de ranuras o barras del rotor. La figura 30 se muestra espectros de corrientes de un motor ideal con espiras cortocircuitadas

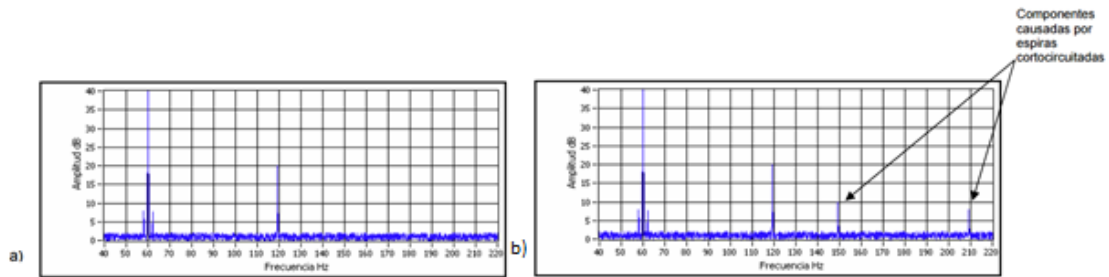


FIGURA 30. Espectro de corriente de motor ideal. a) sin falla b) con falla. [28]

2.4.5 Descargas parciales.

En la actualidad la medida de descargas parciales constituye una herramienta eficaz para el diagnóstico de fallos de aislamiento.

Son aquellas descargas localizadas que cortocircuita solo parcialmente el material aislante entre los conductores, y puede ser o no adyacente a un conductor. [28]

Es un fenómeno de ionización gaseosa transitoria originados en el seno de un gas presente en el interior del sistema aislante, producidas cuando un gradiente de tensión aplicada excede un valor critico denominado tensión de ruptura, ocasionando descargas en los espacios cavidades o huecos que estén presentes en la estructura aislante ayudando a su envejecimiento prematuro. Esta descarga desaparece al alcanzar la denominada tensión de extinción una vez que se produce la caída de tensión en la zona de fallo. Durante esta fase un impulso de corriente aparece a la onda de tensión aplicada

Estos rápidos impulsos de corriente se producen en órdenes de decenas de nanos segundos, como consecuencias de avalanchas electrónicas e iónicas. Aunque por lo general su duración suele ser inferior al micro segundo en dieléctricos gaseosos pueden ser de mayor duración en función de sobretensión aplicada sobre la tensión de ruptura. Ver figura 31. Las descargas parciales pueden ser de tipo interno y externo, será interno si se produce dentro del aislante y externo cuando se produzca sobre la superficie del mismo

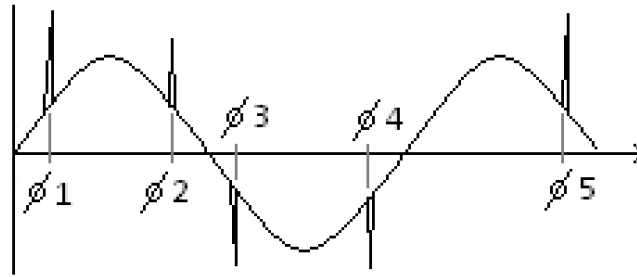


FIGURA 31. Descargas parciales producidas durante un ciclo de tensión [29]

Todas las máquinas eléctricas producen descargas parciales incluso nuevas por los defectos que posee el aislante. Las descargas parciales por lo general son más comunes o de mayor interés en equipos de alta tensión que se encuentran sometidos a esfuerzos térmicos, ataques químicos del ambiente, campos eléctricos, vibraciones e impactos.

Además de la detección de deterioro del aislante las descargas parciales pueden detectar cuñas con holguras, defectos en conductores, contaminación en bobinado, fallos en laminaciones internas, descargas entre fases, ranuras y grietas.

Generalmente en un ensayo de descargas parciales se recurre al uso de un condensador, detector de descargas e impedancia de bloqueo.

El condensador permite la circulación de las señales producidas por los pulsos de corriente provenientes de las descargas parciales, caracterizada por poseer una baja impedancia y alta frecuencia.

El detector de descargas se encarga de introducir en el equipo de medida, las señales provenientes de las descargas parciales. La impedancia de bloqueo, evita interferencias de la propia fuente de alimentación.

El procedimiento de ensaya off-line **IEC 60034-27 del 2006** consiste en aumentar gradualmente la tensión de la fuente aplicada a la máquina sometida a estudio, hasta que los pulsos de las descargas empiezan a aparecer en la pantalla del equipo de medida al rebasarse la tensión de ruptura. Ver figura 32

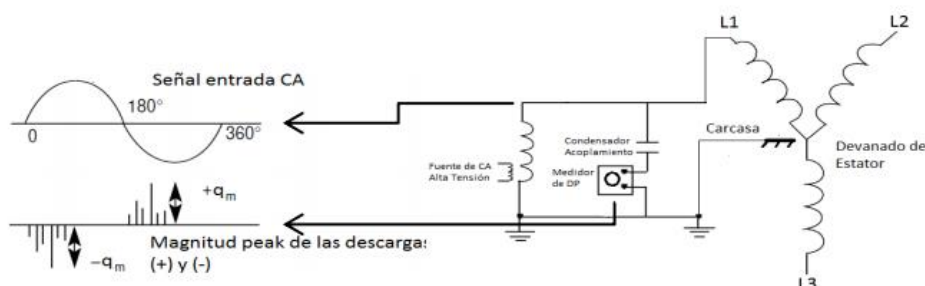


FIGURA 32. esquema de mediciones de las descargas parciales. [30]

La visualización de las descargas se realiza sobre una base de tiempos de la misma frecuencia de la tensión aplicada, las descargas aparecen como una nube de segmentos verticales debido a su corta duración, estos aparecen superpuestos lo que permite identificar en qué momento se produce la descarga en relación a la fase de la onda de tensión.

Dado que la información presentada en la pantalla de un osciloscopio es de tipo instantánea (puntual) y las descargas son de tipo variable, la información debe ser expresada en **fase resuelta**. Esto significa ver la totalidad del evento a través de la grabación acumulativa de eventos, tomándose mediciones cada 30 segundos clasificando las descargas en fase y amplitud. El color representa el número de descargas ver figura 33.

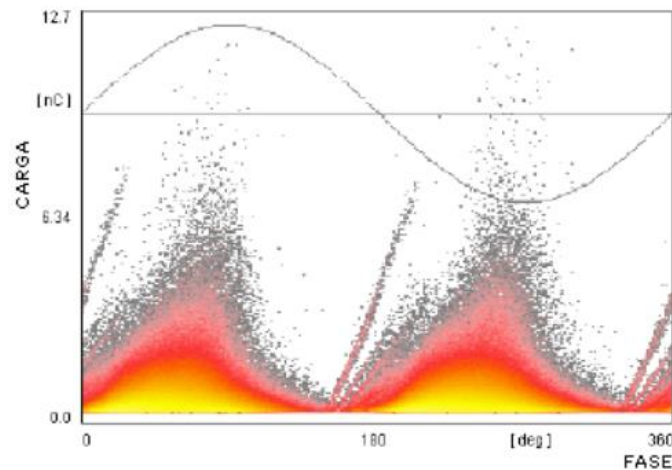


FIGURA 33. Distribución de descargas versus su fase aparición y magnitud de la descarga [31]

El ensayo de descargas parciales no es un método destructivo, pero es necesario realizar algunos otros métodos de diagnóstico del aislante con la finalidad de conocer previamente el estado del aislante y no influir sobre el tiempo de vida útil del objeto ensayado sobre todo cuando su aislamiento se encuentra muy deteriorado.

III. DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE MOTORES TRIFÁSICOS ROTATIVOS MEDIANTE MÉTODOS OFFLINE

En el capítulo anterior se habló brevemente sobre los ensayos offline, como las ventajas que estos presentan a la hora realizar el diagnóstico de un motor eléctrico. En vista de la gran variedad de métodos que aportan información crucial del estado en el que se encuentran nuestras máquinas eléctricas, el presente capítulo pretende profundizar en algunas de ellas.

Se indicará en que consiste cada ensayo, partiendo de una descripción del método, el equipamiento necesario, como valores límites entre los cuales se espera encontrar en los datos obtenidos una vez que se haya realizado las pruebas sobre alguno de nuestros equipos.

La mayoría de técnicas de diagnóstico como, el análisis de vibraciones, o termografía descritas en el capítulo anterior se ven limitadas a la hora determinar la existencia de alguna falla eléctrica, así como su tipo y procedencia, salvo que esta falla se encuentre en un estado avanzado. Por lo que es imprescindible, conocer técnicas que nos permitan identificar prematuramente la existencia de cualquier anomalía y poder corregirla

La mayoría de ensayos offline se centra en establecer el estado del aislamiento de los motores eléctricos, ya que todo tipo de falla producidas en los devanados estáticos son producto del deterioro de su sistema aislante.

3.1 Sistemas Aislante

El sistema aislante en máquinas de baja tensión, este compuesto por un hilo de cobre cubiertas por dos capas de barniz aislante de gran elasticidad y dureza por lo general de poliéster o poliuretano. Los sistemas aislantes en las máquinas de media tensión poseen un devanado preformado Figura 34, están constituidos por un material aislante propiamente dicho, un material de soporte y un material aglomerante. La mica se usa como material aislante, como material de soporte se suele usar vidrio, papel o poliéster

y de material aglomerante se usa resina de tipo epoxi. A partir de estos elementos se construye el aislante de los devanados de las bobinas.

En la fabricación de bobinas individuales se utilizan cintas impregnadas o porosas. En el primer caso la cinta de mica posee la resina de impregnación que actuara como aglomerante. En las cintas porosas, una vez que se haya realizado el encintado de cada bobina después de un proceso establecido se la sumerge en la resina de impregnación y pasa posteriormente a un proceso de curado. Aunque el primer método es más económico y sencillo el segundo es el que da los mejores resultados. Ver figura 34

3.1.1 Estructura Del Aislamiento

En este apartado se hará la descripción de la estructura del aislamiento de motores de mediana tensión los cuales poseen un devanado preformado.

Una bobina preformada suele estar compuesta por espiras cuyo número suele variar entre 2 y 12, cada espira suele estar formada por un conductor elemental que es el elemento conductor propiamente dicho y su número suele rondar entre 2 y 6 por cada espira, esto se realiza con el propósito de disminuir las perdidas eléctricas. Cada elemento conductor se aísla por separado y posteriormente se unen para formar una espira a la que finalmente se le aplica el aislamiento correspondiente conocido como muro aislante. Ver figura 34.

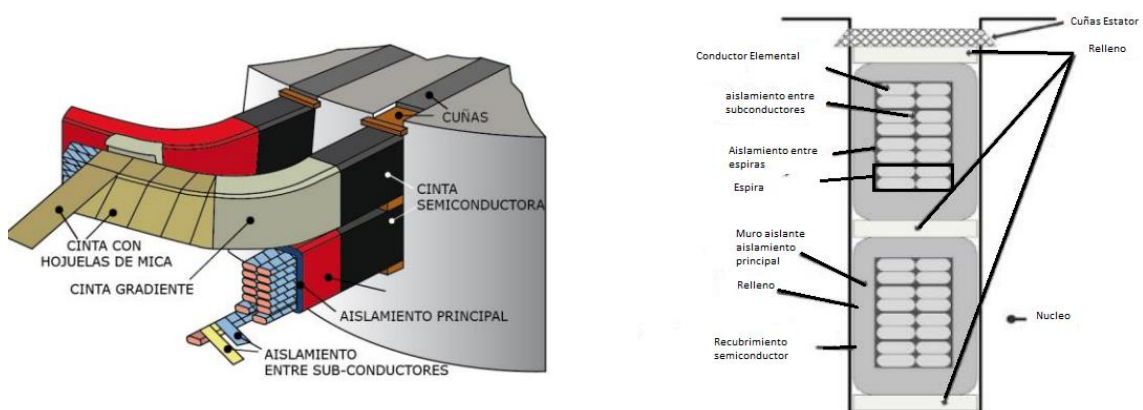


FIGURA 34. Diferentes estructuras aislantes aplicadas en forma de cintas para a) Barras tipo Roebel, b) devanado preformadas [32]

El muro aislante es el elemento de mayor espesor que separa la bobina con el exterior. Debe estar dimensionado para soportar la tensión correspondiente al nivel de aislamiento de la máquina, su misión es evitar los cortocircuitos a tierra. A más de ello sistema aislante de una máquina en funcionamiento está sujeto a esfuerzos mecánicos, eléctricos térmicos y de entorno ambiental

3.2 Resistencia del aislamiento a tierra

Esta prueba es de tipo cuantitativa, que de por si no indica la calidad en el que se encuentra el aislante sino el grado de contaminación del aislamiento a partir del cual obtener una idea de cómo se encuentra el estado del aislamiento en una máquina eléctrica. Del ensayo obtenemos un valor denominado **Resistencia De Aislamiento**, que resulta de combinación de paralelo de todos los aislantes que se pueden encontrar entre los conductores y tierra. Al llevarse un registro de este valor en caso de existir una tendencia descendente, puede ser indicativo del inicio de degradación del dieléctrico.

La medida de este valor se basa en la aplicación de una tensión continúa a un circuito capacitivo formado por un conductor-aislante-hierro, esta tensión produce una circulación de corriente que se interpreta como:

$$R_{aisl} = \frac{E}{I} \quad (3.1)$$

$$I = I_{abs} + I_{fuga} + I_{capacitancia} \quad (3.2)$$

La corriente que circula por el aislante se divide en una corriente capacitiva, la cual baja a 0 en pocos segundos y depende de la capacitancia de la bobina, la corriente de absorción, que es el resultado de la polarización de las moléculas del aislamiento y depende del material, y la corriente de fuga que es constante con el tiempo y depende estado del aislamiento. Ver figura 35

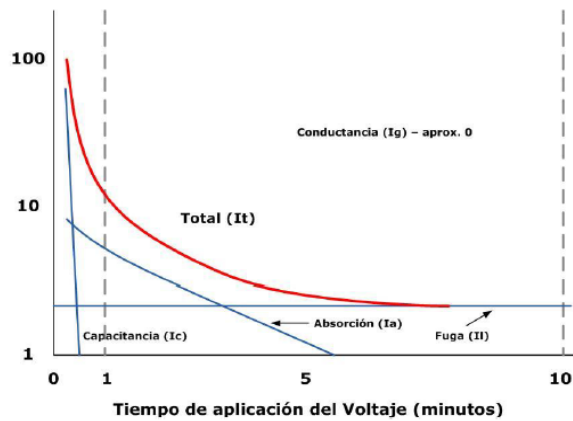


FIGURA 35. Corriente capacitiva, de fuga y absorción. [33]

El valor de la resistencia del aislamiento se puede determinar a través del uso de un voltímetro que determine la tensión aplicada y el uso un amperímetro de gran sensibilidad pues la intensidad que circulara por el aislante es muy pequeña ya que la resistencia del aislante se encuentra en el orden de Megaohmios. Aunque también se puede usar un megohmetro o Megger.

Normalmente se realiza el test sobre el devanado en conjunto para obtener un valor de resistencia global del aislamiento, en este caso, se conecta el Megger entre la carcasa de la máquina y cualquiera de los terminales los cuales pueden estar conectados entre sí en estrella o triángulo.

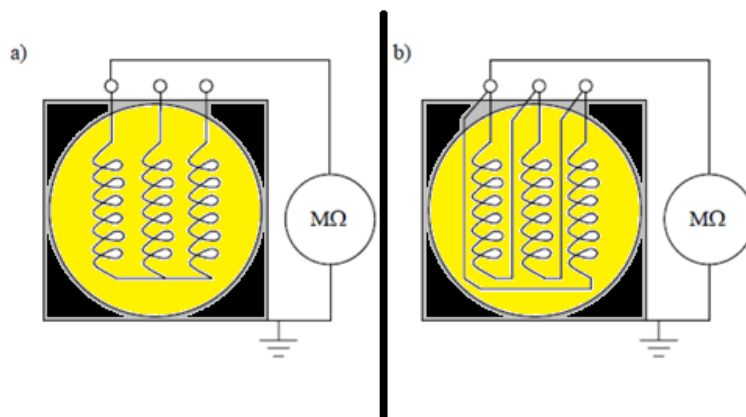


FIGURA 36. Medición de la resistencia de los devanados del estator. A) conexionado en estrella, B) conexionado en triángulo

En el caso de que la resistencia global del aislamiento sea baja se puede recurrir a medir la resistencia del aislamiento de cada fase en donde las dos fases restantes que no están sometidas a prueba se las conectara directamente a tierra, de esta manera se intentara detectar la fase problemática. Ver figura 36.

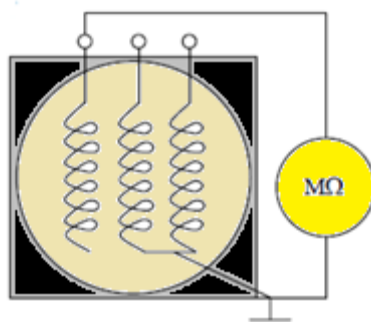


FIGURA 37. Medición de la resistencia de aislamiento de cada fase

El ensayo se lo realiza aplicando una tensión en continua entre 500 a 5000 V, la tensión que se aplica se lo realiza en función de la tensión de funcionamiento en condiciones normales. De aplicar una tensión elevada la resistencia del aislamiento puede disminuir además de la generación de esfuerzos dieléctricos elevados.

La norma IEEE 43-2000 e IEEE-43-2013 establecen las tensiones de prueba en continua que se debe aplicar para su correspondiente tensión de alimentación en alterna.

Tabla 3. Máxima tensión en continua aplicable al aislamiento en Función de su voltaje de alimentación.

V línea AC	V Prueba DC
< 1000 VCA	500 VDC
1000-2500 VCA	500-1000 VCD
2501-5000 VCA	1000-2500 VCD
5001-12000 VCA	2500-5000 VCD

La medición se toma cada 60 segundos luego de alcanzar el valor del voltaje de prueba, la medición se la puede realizar en el panel de arrancadores y si el valor obtenido presenta alguna anomalía se puede hacer la prueba directamente sobre la caja de bornes del motor.

Los valores mínimos de resistencia de aislamiento en Megaohms está dada por la Norma IEEE 43-2000 que establece:

Tabla 4. resistencia mínima de las bobinas

Resistencia mínima	Descripción
$IR_{\min} = kV+1$	Para la mayoría de bobinas fabricadas antes de 1970.
$IR_{\min} = 100$	Armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970
$IR_{\min} = 5$	Para la mayoría de bobinas simple y espiras perforadas clasificadas bajo 1KV

La lectura de la resistencia del aislamiento puede verse afectada por las condiciones en las que se encuentra la superficie, por el efecto de la humedad y la temperatura.

Condición de la superficie, influye especialmente cuando se trabaja en entornos hostiles de abundante polvo y humedad, en el cual, las partículas de polvo tienen a formar una fina capa sobre el aislamiento que al entrar en contacto con la humedad o algún otro líquido se vuelve parcialmente conductor, y tienden a disminuir su resistencia. En caso de que se produzca esto, es restablecer la resistencia del aislamiento efectuando operaciones de limpieza o secado.

El efecto de la humedad, la presencia de una alta humedad en el ambiente puede ser crucial para el correcto funcionamiento de nuestras máquinas eléctricas, ya que esta puede ser absorbida a través de los poros del aislamiento reduciendo su resistencia, o puede distribuirse por el volumen del aislante disminuyendo su resistividad. Se podría recurrir en estos casos al secado del aislamiento para recuperar su resistencia.

Efecto de la temperatura, la resistencia del aislamiento es inversamente proporcional a su temperatura, es decir, que cuando la temperatura aumenta su resistencia disminuye, esto dificulta el obtener una concordancia al comparar los valores de ensayos de aislamiento ya que serán distintos a varias temperaturas, es por esto que la Norma IEE 43-2000 establece hacer una corrección a una temperatura base de 40°C

La corrección se realiza a través la ecuación 3.2, donde R_c es la resistencia del aislamiento corregida a temperatura base, R_t es la resistencia del aislamiento a la temperatura de medida y K_t es el coeficiente de temperatura de la resistencia del aislamiento a la temperatura t, el valor K_t .

$$R_c = K_t * R_t \quad (3.3)$$

En el caso de termoplásticos el valor de K_t puede ser obtenido mediante:

$$K_t = 0.5^{(40-T)/10} \quad (3.4)$$

En el caso de termoestables el valor de K_t es dado por la Norma IEE 43-2000 que puede ser obtenido a través de la gráfica.

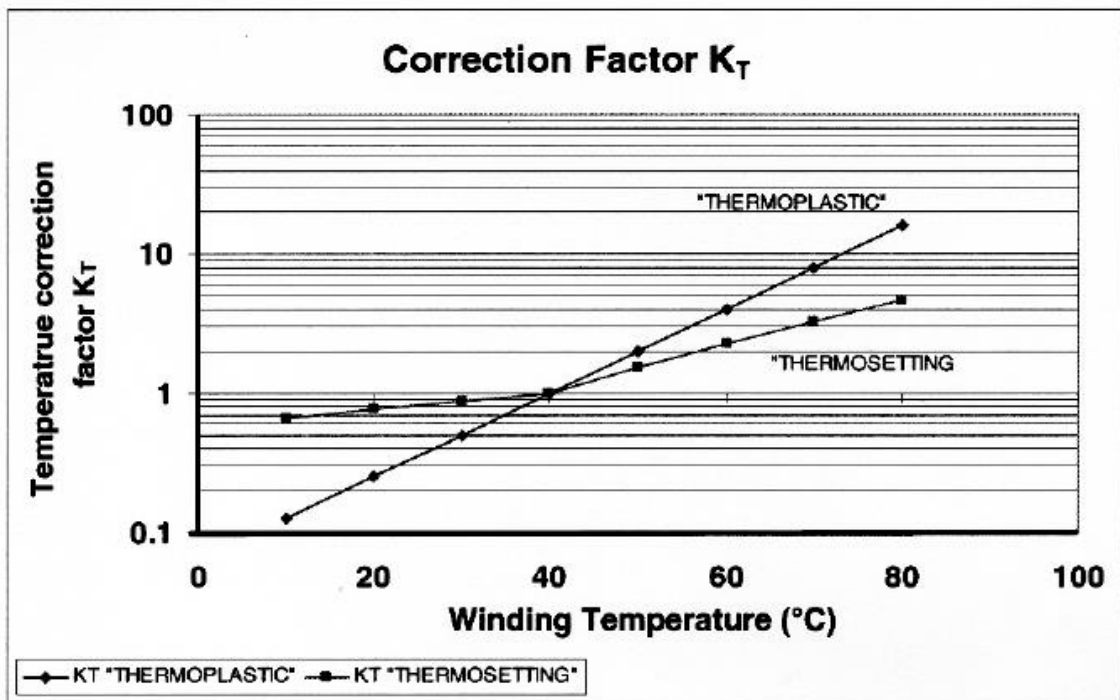


FIGURA 38. Curvas de coeficiente K_t para una temperatura base de 40°C , IEEE [34]

3.3 Índice de polarización

El índice de polarización I.P. es uno de los parámetros usados para conocer es estado de la resistencia de aislamiento en las máquinas eléctricas. Es definido por IEEE 43-2013 como la relación entre la resistencia de aislamiento del motor medida después de 10 minutos $I.R_{.10}$, con respecto a la resistencia de aislamiento medida después de 1 minuto $I.R_{.1}$, una vez que se ha aplicado un escalón de tensión. El I.P. viene definido por la siguiente formula:

$$I.P. = \frac{I.R_{.10}}{I.R_{.1}} = \frac{I_{conduccion}}{I_{absorcion} + I_{conduccion}} \quad (3.5)$$

El I.P. sirve como indicativo a la hora de valorar el grado de sequedad y el grado de limpieza del aislamiento, es aplicable a cualquier máquina, muy útil a la hora de conocer el estado de motores de gran potencia.

El contenido de humedad y contaminación del aislamiento aumentan la corriente de absorción y en mayor escala la corriente de conducción o fuga.

La corriente de absorción depende de la estructura interna del aislante, y por lo tanto sirve como medida de la cantidad de impurezas conductoras que existen en él. La temperatura influye sobre este valor y debe ser corregido. En Europa se suele realizar correcciones a una temperatura base de 20 °C pudiendo aplicar la expresión empírica 3.6 Donde I_{20} es el valor corregido a 20 °C e I_t es la corriente medida a la temperatura t.

$$I_{20} = \frac{I_t}{10^{0.022*(t-20)}} \quad (3.6)$$

Por otro lado, corriente de conducción está formada por dos tipos de corrientes uno de origen interno y otra de origen externo. La de origen interno es consecuencia de una degradación local o generalizada del aislamiento y nos permite descubrir la presencia de agua, la de origen externo también llamada corriente dispersión es producto de las corrientes vagabundas, que discurre sobre la superficie del aislante, pudiendo registrar un valor elevado cuando hay humedad y contaminación [35]. Esta se encuentra

fuertemente influenciada por la temperatura por lo que se la debe corregir a una temperatura base de 20 °C pudiendo aplicar la siguiente expresión empírica:

$$I_{20} = \frac{I_t}{10^{0.035*(t-20)}} \quad (3.7)$$

Un valor bajo de I.P. es indicativo de la existencia de humedad o contaminación puesto que la $I_{conduccion}$ es mayor que la $I_{absorcion}$, por lo general se suele situar entre un valor de 1 a 7. Si el valor de resistencia a tierra a 1 min. es mayor a 5000 Mega ohmios, el I.P. calculado puede no ser significativo, por lo tanto, cuando exista esta condición, la determinación del valor I.P. debe ser descartada como medio de diagnóstico.

La norma IEEE 43-2013, establece valores recomendados de I.P. Para motores según su clase de aislamiento.

Tabla 5. Valores I.P. recomendados

Clasificación del aislamiento	I.P. mínimo
Clase A	1.5
Clase B, F y H	2.0

Estos valores son válidos para devanados impregnados con barniz o material asfáltico., un índice de polarización menor que 1 indicaría un aislante deteriorado, un I.P. elevado para un devanado de más de 20 años superior a 5, nos podría indicar que su aislante esta reseco y quebradizo. Para los motores de tracción se recomienda que el índice de polarización sea superior a 2. Los valores utilizados para establecer el estado de funcionamiento en el cual se encuentra nuestro motor se encuentran en la tabla 6. [36]

Tabla 6. estado del aislante según el índice de polarización.

I.P.	Estado del aislante
≤ 1.2	Aislamiento muy débil con corrientes de fuga elevadas por hidratación profunda o fuerte contaminación superficial.
$1.2 \leq I.P. < 2.5$	Aislamiento húmedo o contaminado
$2.5 \leq I.P. < 4$	Aislamiento seco y limpio
> 4	Aislamiento con buena sequedad y sin contaminación.

Debido a que los nuevos sistemas, se polarizan rápidamente, se inventó la prueba de absorción dieléctrica (AD) que consiste en una relación de la suma entre corriente de absorción y conducción tomadas a los 30 segundos ($I.R_{.30s}$) con respecto a la suma de los mismos elementos tomados a 1 minuto ($I.R_{.1min}$), después de haber aplicado el escalón de tensión, algunas pruebas AD pueden variar hasta una relación de 30 segundos a 3 minutos. Los escalones de tensión son similares a los encontrados en la tabla 3

$$AD = \frac{I.R_{.1min}}{I.R_{.30s}} \quad (3.8)$$

Esta prueba conviene realizarla especialmente para motores cuya potencia sea inferior de 100-150 CV. Con esta prueba se obtiene la condición en la que se encuentra el estado del aislamiento y la presencia de humedad en caso de existir.

Los valores recomendados de AD se los puede observar en la tabla 7:

Tabla 7. Valores del estado del aislante según la prueba de absorción dieléctrica.

VALOR AD	CONDICIÓN
<1.25	Insuficiente.
1.25<AD<1.6	Ok
>1.6	Excelente.

Las pruebas de índice de polarización y absorción dieléctrica son muy difíciles de realizar correctamente. Es necesario siempre cuestionarse sobre los resultados obtenidos considerando previamente en que medio se encuentra el motor, si está húmedo, contaminado, o existe la presencia de sustancias químicas, etc. Con la finalidad de tomar una correcta decisión para restablecerlo a un óptimo estado de funcionamiento.

Cuando se realizan las pruebas de índice de polarización y absorción dieléctrica, los motores quedan polarizados, por lo que es necesario despolarizarlos mediante la aplicación del motor a tierra durante un tiempo mayor al tiempo de realización de las pruebas.

Es necesario que el instrumento utilizado para medir el índice de polarización y absorción dieléctrica pueda medir al menos entre 20 mil Mega ohmios, aunque se recomienda uno de 50 mil Mega ohmios.

En una prueba de A.D. y I.P., figura 39 la pendiente de la curva muestra la condición del aislamiento, un aislamiento en buen estado (curva B), muestra un incremento

continuo de la resistencia. Un aislamiento húmedo o fracturado (curva A), muestra una resistencia relativamente constante. [37]

En motores nuevos, debido a los constantes avances en el estudio de materiales, la curva de resistencia de aislamiento puede presentar una pendiente muy baja, ver figura 39, (curva C) no por ello debe considerarse que posee algún fallo en su proceso de fabricación. En estos casos se recomienda realizar un histórico de la máquina y ver su evolución con el paso del tiempo.

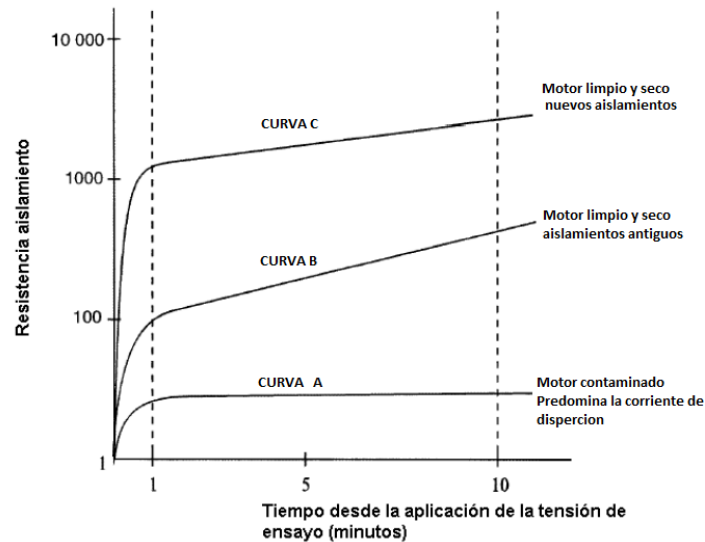


FIGURA 39. Curvas de resistencia de aislamiento durante el ensayo de índice de polarización.

[37]

3.4 Prueba estándar capacitiva (rastreo de arco)

Esta prueba indica la limpieza y humedad de la parte externa de los devanados. La razón por la cual la capacitancia de un motor aumenta con la contaminación se muestra en la forma de cómo trabaja un capacitor. En donde dos placas de material conductor separadas por un dieléctrico forman un capacitor. Ver figura 40. En este medio la corriente inicialmente es grande pero su vida es relativamente corta, y cae exponencialmente a un valor cercano a cero conforme el objeto bajo prueba se carga, normalmente baja a cero en el primer minuto, por eso la prueba debe durar al menos este tiempo. [9] aquí el material aislante se carga del mismo modo que el dieléctrico en un capacitor en el cual a mayor contaminación y humedad presente mayor será su capacidad de carga.

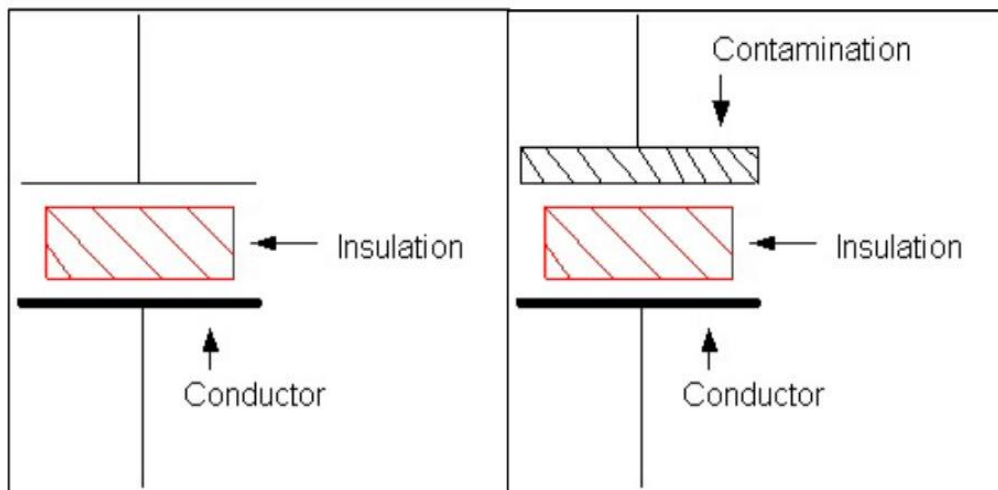


FIGURA 40. Formación de un capacitor con la contaminación del devanado [9]

A través de esta prueba se obtienen valores en el orden de picofaradios, en donde una señal de corriente AC a alta frecuencia proporciona la mitad de la capacitancia a tierra, cuando la capacitancia aumenta la resistencia disminuye, por lo que una alta capacitancia indica que el motor debe ser limpiado. Además, una contaminación excesiva del motor reduce su habilidad para disipar calor, resultando en un envejecimiento prematuro del sistema de aislamiento.

La capacitancia de aislamientos secos no es afectada apreciablemente por la temperatura; sin embargo, en los casos de aislamientos húmedos o contaminados, esta tiende a incrementarse con la temperatura. [38]

La máxima capacitancia que un equipo de prueba puede aceptar para tener mediciones confiables viene expresada por la ecuación 3.9

$$C = \frac{I}{\omega * V} \quad (3.9)$$

Donde I es la magnitud de la corriente de carga, ω es la frecuencia angular $2 * \pi * f$ y V el potencial aplicado.

Factores que pueden afectar a la Capacitancia a Tierra son El uso de condensadores en el circuito, Diseño del motor, Longitud de los cables, Tipo de aislamiento.

3.5 Prueba Hi-Pot.

Cuando evaluamos un motor mediante pruebas estáticas se busca obtener, una elevada rigidez dieléctrica y la capacidad de conservar las propiedades del aislamiento

La prueba Hi-Pot o de alto potencial, busca probar la rigidez dieléctrica en materiales aislantes, es decir se desea obtener el gradiente de potencial máximo que soporta el material aislante antes de producirse la rotura. Para un aislante, cuando la tensión aumentada, la corriente aumentará proporcionalmente. Sin embargo, justo antes que el aislamiento presente rotura, la corriente aumentará más rápido que la tensión. En tensiones aún más altas, la corriente se comporta aumentando más rápidamente. La clave para las pruebas de Hi-Pot es la búsqueda de la corriente que está creciendo más rápido que el aumento en la tensión que se aplica al bobinado. [39]

Esta prueba solo evalúa el aislamiento entre los conductores y la pared de la ranura del núcleo estática. Por lo tanto, no se puede usar para detectar un fallo o corto entre espiras.

Es importante que el devanado se encuentre seco y limpio antes de realizar una prueba Hi-Pot, por lo que efectuar una prueba de resistencia del aislamiento, una prueba del índice de polaridad o de absorción dieléctrica antes de efectuarla resulta esencial para obtener valores fiables del estado en el que se encuentra el aislamiento.

Para aplicar la prueba de Hi-Pot es necesario seleccionar la tensión de prueba máxima según lo siguiente:

- En máquinas nuevas y rebobinados, ya sea en fábrica, en taller o en el campo. Para pruebas de aceptación, la tensión de prueba en CD es $2(U)+1000$ es la tensión línea.
- Prueba de mantenimiento en máquinas en servicio, la prueba se realiza a la tensión DC de $1.7*(1.25 \text{ a } 1.5 U_n)$, donde U_n es la tensión nominal

En esta prueba se aplica tensión a una de las fases y se mide la corriente que circula a través de ella, las fases restantes son conectadas en paralelo y puestas a masa, también se puede medir la influencia del devanado sobre las otras dos fases colocando un amperímetro en serie entre la masa y las fases ver figura

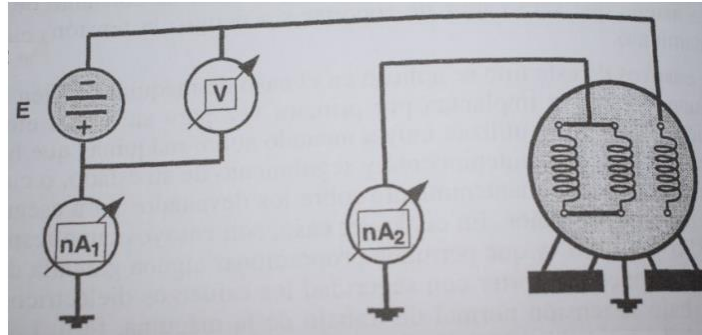


FIGURA 41. Conexión para la realización del ensayo Hi-Pot. [40]

3.5.1 Tipos de prueba Hi-Pot

La norma IEEE 95-1977 sugiere las siguientes formas para aumentar la tensión de prueba.

1. Curva de tensión. - es la que permite llegar de manera muy rápida a la tensión de prueba. Consiste en ajustar la tensión de acuerdo a un esquema de tiempos cada vez menor por lo que la corriente de absorción no se considera. Aquí el escalón inicial de tensión es del 30% de la máxima de prueba y se aplica y mantiene durante 10 minutos, la prueba continua con escalones de tensión hasta el valor máximo. Se puede utilizar para la fabricación de bobinas y cables.

2. Prueba de Rampa: Es la prueba que permite elevar la tensión de manera más lenta (fijado por el usuario) para evitar daños en el aislamiento, permitiendo de esta manera identificar las fugas de corriente en la superficie sin necesidad de alcanzar un nivel crítico. Además, permite hacer un mejor manejo de las componentes capacitivas y de absorción. En esta prueba cualquier variación en la velocidad del aumento de la tensión hará variar los resultados, porque una tensión de alimentación estable y bien regulada es esencial.

3. Prueba Step Voltage: Es la prueba menos estresante que las otras debido a que el voltaje a aplicar y el intervalo de tiempo es preestablecido por el usuario. El primer paso se lo realiza en los primeros diez minutos, y se lo utiliza para establecer el índice de polarización y determinar si el devanado es apto para la prueba. Los pasos posteriores no deben superar el 3% de la tensión final y debe ser mantenido como mínimo 1 minuto antes de pasar al siguiente escalón, lectura de corriente se toma al final de cada

intervalo. Esto permite que las fugas de corrientes también se estabilicen. Este tipo de prueba la recomendada por algunos fabricantes de equipos.

Para un motor de 4160 V, son típicos escalones de 1000 V e intervalos de mantenimiento de un minuto. Para motores de tensión menor a 4160V, es usual utilizar escalones de 500 V.

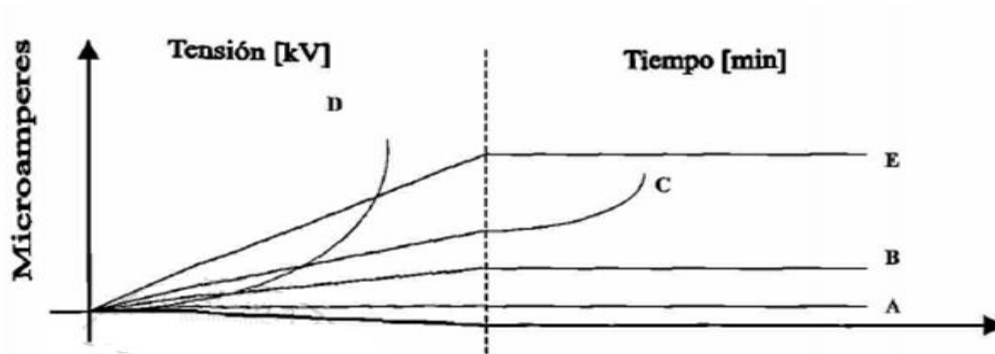


FIGURA 42. Curvas típicas de corriente en el tiempo de una prueba HI-Pot. [41]

Las curvas características que se pueden obtener al efectuar este ensayo se las puede observar en la figura 41, donde la curva A representa la curva típica de un motor con buen aislamiento, la curva B un motor con buen aislamiento, pero terminales húmedos, la curva C representa un aislamiento con impurezas, la curva D es producto de la presencia de materiales conductores sobre el aislamiento, y la curva E representa la presencia de humedad no siendo suficiente para provocar la falla

La tensión a la que se produce el fallo no puede ser siempre predicha a partir de la curva resultante del ensayo. Para un bobinado en buenas condiciones se obtendrá una curva ascendente de la corriente frente la tensión aplicada, cualquier desviación de la curva debe ser considerada como la aproximación a la tensión de ruptura, mientras más cerca del fallo mayor es el incremento de la corriente frente a la tensión, en caso de se presente alguna indicación del fallo es necesario verificar que esta no sea producto del efecto corona del equipo a los cables de inspección.

Contrario a la corriente un aislamiento ideal producirá lecturas idénticas de la resistencia a todas las tensiones, aunque un comportamiento ligeramente descendente es también válido, mientras que un aislamiento en mal estado mostrará una caída en el valor de su resistencia de aislamiento, conforme aumenta la tensión.

3.6 Prueba de impulso o surge

La prueba Surge en 1936 y fue desarrollado por General Electric y Westinghouse. El aislante entre espiras o bobinas en una máquina eléctrica resulta ser el punto más débil en el cual se puede generar una falla por aislamiento. Con la prueba de impulso se puede determinar si se encuentra produciendo arcos eléctricos entre espira a espira, fase a fase o bobina a bobina debido a la existencia de una falla en el aislamiento [42]

Generalmente se usa esta prueba en el control de calidad de devanados fabricados o reparados para controlar la existencia de fallo en máquinas en funcionamiento.

Al utilizar un “surge” en una bobina o máquina rotatoria, ésta da por respuesta una señal sinusoidal amortiguada, la cual es única para cada bobina y depende principalmente de su inductancia. La frecuencia de la respuesta queda determinada por la siguiente expresión. [41]

$$f = \frac{1}{2 * \pi \sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

Donde f es la frecuencia en Hz, L es la inductancia de la bobina en unidades de H y C es la capacitancia entre el aislamiento y masa en unidades de F. Una respuesta surge del sistema se puede ver en la figura

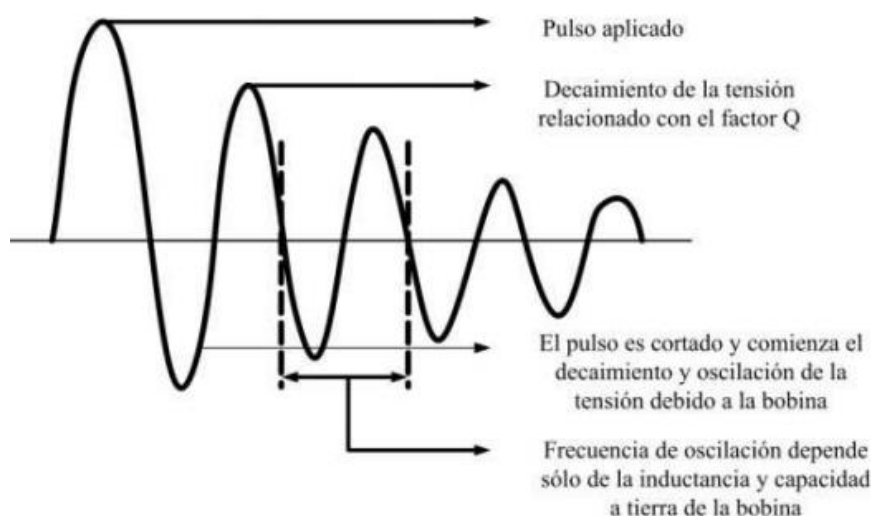


FIGURA 43. Respuesta surge del sistema.[43]

La ecuación 3.9 indica que cualquier cambio en la inductancia o capacitancia producirá un cambio en la frecuencia de la onda, sin embargo, el voltaje o amplitud del valor de onda (V) disminuye por el cambio en la inductancia, la cual es determinada por la ecuación 3.10 en la cual la corriente varía con el tiempo, cuando existe un corto entre espiras, entonces abra menos vueltas y con ello un cambio en la inductancia de la bobina y aumento de frecuencia.

$$V = L * \frac{di}{dt} \quad (3.10)$$

La técnica consiste en aplicar corrientes de impulso que generen ondas sinusoidales amortiguadas. Usando durante tiempos de subida muy rápidos del orden de 0.2 us y de amplitud ajustable, altos impulsos de corrientes a dos bobinados simultáneamente. Cada impulso provocara una diferencia de tensión entre espiras que son parte del bobinado.

Para este método la salida de alta tensión del generador de impulsos se conecta a dos de las fases y la tercera se conecta a tierra y la visualización de las ondas se la realiza a través de un osciloscopio que se encuentra conectadas de igual manera las dos fases en las cuales se ha colocado el generador de impulsos.

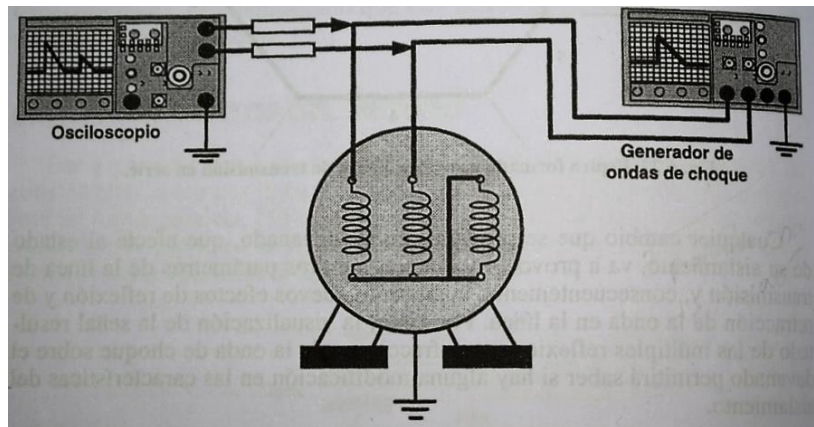


FIGURA 44. Esquema básico de ensayo de prueba Surge. [42]

Si los devanados no presentan ninguna deficiencia las formas de las ondas reflejadas serán idénticas, superponiéndose la una sobre la otra apareciendo como un solo traza en la pantalla de visualización.

Si el aislamiento entre dos espiras, fases, bobinas es muy débil y la diferencia de voltaje suficientemente alta se provocará un arco eléctrico, provocando un cambio en la onda que se puede visualizar a través del equipo. Los cambios de la forma onda cuando existe un problema entre espiras pueden ser: un desplazamiento del patrón de onda hacia la izquierda o una disminución de la amplitud de onda. Ver figura 42.

Las espiras cortocircuitadas darán paso a diferencias bastante pequeñas de la amplitud de la onda. Cuando un aislamiento entre espiras es débil se produce un arco de baja energía cambiando la inductancia, provocando que el patrón de la onda se vuelva inestable cambiando de izquierda a derecha y volviendo rápidamente a su posición original. Los defectos más graves como cortocircuitos entre fases tienden a provocar alteraciones mucho más acusadas.

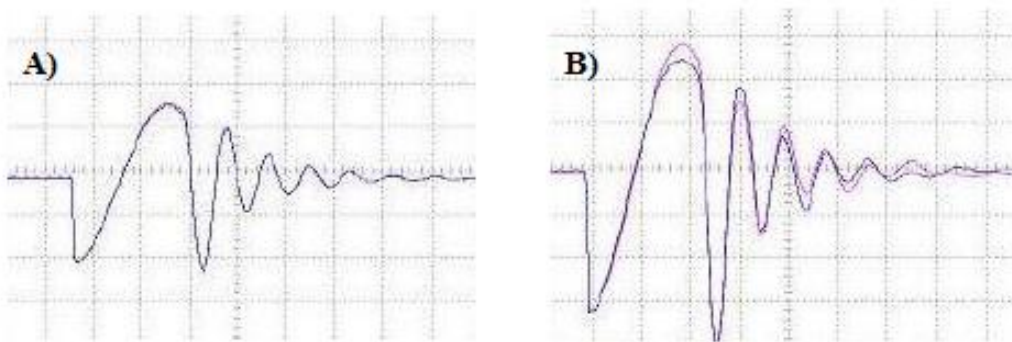


FIGURA 45. A) Bobinas sanas, B) Bobinas defectuosas [44]

3.7 Medida de inductancia fase a fase

La medida de la inductancia fase a fase puede ser útil para evaluar una variedad de situaciones como pueden ser, falla en rebobinado o reparación pobre o incorrecta, pérdida de espiras, fallos en los cables de alimentación o en contactos en el circuito de potencia, como las más importantes

Esta técnica consiste en medir la inductancia de cada fase y comparar los valores entre sí, en el caso de sufrir una variación el valor límite de desequilibrio debe ser de un máximo del 7% para devanado preformado y 12% para aleatorio. La desviación máxima es calculada por la ecuación 3.11

$$Desequilibrio L(\%) = \left| \frac{\text{desviación max respecto al promedio}}{\text{valor promedio}} \right| * 100 \quad (3.11)$$

En la figura 50 se muestra un ejemplo de desequilibrio inductivo, en el cual el porcentaje de inductancia entre las fases es superior al máximo con un valor de 17.65% en relación al 7% o al 12% permitido por lo que nos encontramos frente a un caso grave de deterioro del aislamiento

Frequency	1200
Mohm Ph 1 to Gnd	
Charge Time	60
Voltage	500
Motor Temp	28
Measured Mohm	0.0
Corrected Mohm	0.0
pF Ph 1 to Gnd	35750
ohm Ph 1 to 2	0.05250
ohm Ph 1 to 3	0.05950
ohm Ph 2 to 3	0.06150
mH Ph 1 to 2	1.980
mH Ph 1 to 3	2.165
mH Ph 2 to 3	2.675
Avg. Inductance	2.273
% Res. Imbalance	9.22
% Ind. Imbalance	17.67
\$ Power Loss	260.23

FIGURA 50. Ejemplo de desequilibrio inductivo [45]

Para un mayor entendimiento de la forma de cómo se obtiene el desequilibrio se hará uso de la ecuación 3.11, considerando que el valor promedio es obtenido de los valores de inductancia medidos en cada fase que en nuestro caso será de 2.273, y como desviación máxima será 0.40 considerando que el valor más lejano de inductancia con respecto al promedio es 2.675

$$Desequilibrio L(\%) = \left| \frac{2.675 - \left(\frac{1.98 + 2.165 + 2.675}{3} \right)}{\left(\frac{1.98 + 2.165 + 2.675}{3} \right)} \right| * 100 = 17.66$$

3.8 Desventajas de las técnicas Offline

Estas técnicas presentan algunas limitaciones, entre las más desfavorables como se mencionó en el capítulo anterior, requieren que las máquinas sobre las cuales se van a realizar los ensayos, se encuentren fuera de funcionamiento. Adicional a ello dependiendo de la técnica que se utilice, es necesario realizar mediciones en ciertos puntos de difícil acceso, y para ello, se debe desmontar una serie cables y piezas, por lo que el tiempo de parada de la producción se ve incrementado.

En el caso de encontrarse con alguna avería, no se puede dar un diagnóstico apresurado de su existencia, si únicamente se realizó una sola prueba sobre el motor analizado, por lo que debe ser corroborado por ensayos que permitan poner en evidencia su existencia y converjan a un mismo resultado.

Además, las técnicas no son aplicables a toda gama de motores, como es el caso del ensayo I.P., el cual no se puede realizar, en máquinas rotativas con baterías de condensadores, que posean un área superficial extremadamente grande, o aquellas en las que su aislamiento polarice muy rápido, debido a que darían valores errados de I.P., en estos casos hay que basarse en los historiales de la máquina.

Por otro lado, existe el riesgo de provocar la ruptura o se llegare ha fragilizar el dieléctrico con un ensayo de alta tensión si este se encuentra deteriorado, y no ha existido alguna evidencia previa durante la determinación del su índice I.P o D.A.R. pudiendo provocar paradas inesperadas en la producción.

Cometer errores en el diagnóstico de los motores a través de los resultados obtenidos es muy fácil si no se tiene las precauciones necesarias, ya que puede existir un mal uso de la tensión aplicada, un deterioro de los cables de medición, una mala conexión, un fallo del equipo de medición, una incorrecta despolarización del sistema aislante, dando como resultado valores erróneos, por lo que se recomienda que en el caso de que exista alguna irregularidad, repetir el proceso para cerciorarse que el resultado es correcto.

IV. EQUIPO Y MOTORES ANALIZADOS

En este apartado se da conocer el tipo de motores analizados como equipo utilizado, describiendo algunas de sus características más relevantes, las cuales servirán para poder determinar la tensión a aplicar además de ayudar a determinar el estado en el cual se encuentran, estos motores.

4.1 MOTORES

A los motores se los ha agrupado por el modelo de fabricación con el propósito de condensar la información y evitar que esta sea tan repetitiva, dentro de cada modelo se describe cuáles son las particularidades con las cuentan por que ha sido seleccionado para objeto de estudio.

4.1.1 MOTOR ASÍNCRONO INDAR

Se procederá a realizar las pruebas y ensayos de resistencia de aislamiento sobre dos motores asíncronos Indar de 15 CV, pertenecientes al laboratorio de máquinas eléctricas y tecnología eléctrica E.T.S.I.I, figura 46.



FIGURA 46. Motor trifásico asíncrono marca Indar 15 CV.

Una de las particularidades de estos motores es que han permanecido en este departamento aproximadamente por un periodo de 30 años dentro de los cuales no se les ha proporcionado ningún tipo de mantenimiento. Estos motores han permanecido en

funcionamiento por cortos lapsos de tiempo, con la mayor parte de su vida útil fuera de funcionamiento, su principal utilización ha sido en la formación y capacitación de nuevos profesionales, los cuales se han valido de estos, para realizar una serie de prácticas y estudios en pro de la búsqueda de conocimiento.

La tabla 8, muestra una serie de parámetros y características que poseen este tipo de motores, los cuales nos servirán para poder establecer las tensiones de prueba que será aplicada sobre su sistema aislante, así como el valor mínimo que este debería poseer. De igual forma a través de la identificación del tipo de aislante aplicado en su devanado se podrá hacer uso de la norma IEE 43-2013 con la cual se podrá comparar y determinar el estado en el cual se encuentra.

Tabla 8. características y especificaciones del motor asíncrono Indar.

Motor INDAR asíncrono 11385-11381			
Revoluciones (rpm)	1480		
Frecuencia (Hz)	50		
Voltaje estator Δ/Y (V)	220/380		
Intensidad estator Δ/Y (A)	40/23		
Tipo de aislamiento	Clase B	Temperatura máxima °C	130
		Material aislante	Impregnante o barniz
		Tejidos de fibra de vidrio y amianto. Mica sola o con soporte de papel.	Barnices y resinas a base de epóxidos, melanina o poliéster reticulado.
		Esmalte a base de poliuretanos y polivinilo. Cintas de fibra de vidrio y mica.	
Rotor voltaje (V)	310		
Intensidad rotor (A)	26		
Factor de potencia ($\cos \varphi$)	0.84		
Potencia CV/kW	15/11.03		

4.1.2 MOTOR SÍNCRONO INDAR

Se analizarán 3 motores síncronos Indar de 4 kW, figura 47, los cuales se han encontrado trabajando bajo condiciones muy similares a los mencionados en el punto 4.1.1.

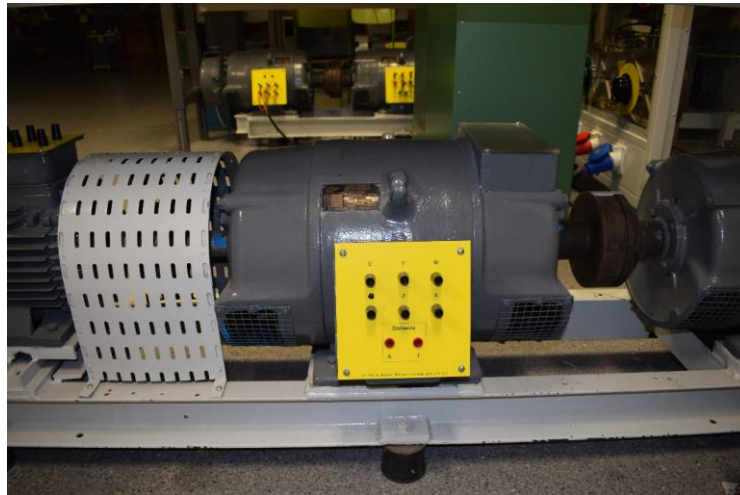


FIGURA 47. Motor trifásico síncrono Indar de 4 kW.

La tabla 9, muestra una serie de parámetros y características que como en el caso anterior nos permitirán determinar, la tensión máxima a aplicar, el valor mínimo de la resistencia del sistema aislante, como el valor mínimo de I.P. que debería tener una vez finalizadas las pruebas.

Tabla 9. características y especificaciones del motor síncrono Indra 180S.

Motor INDAR síncrono 11384-11382-11380.			
Revoluciones (rpm)	1480		
Frecuencia (Hz)	50		
Voltaje estator Δ/Y (V)	220/380		
Intensidad estator Δ/Y (A)	13/7.5		
Tipo de aislamiento	Clase B	Temperatura máxima °C	130
		Material aislante	Impregnante o barniz
		Tejidos de fibra de vidrio y amianto. Mica sola o con soporte de papel.	Barnices y resinas a base de epóxidos, melanina o poliéster reticulado.
		Esmalte a base de poliuretanos y polivinilo. Cintas de fibra de vidrio y mica.	
Factor de potencia ($\cos \varphi$)	0.80		
Potencia CV/kW/ kVA	5.36/4/5		
Excitador			
Máximo	50 a 8		

4.1.3 MOTOR ASÍNCRONO GENERAL ELECTRIC FM132MX/4

Este motor es de tipo asíncrono, a diferencia del motor descrito en el punto 4.1.1. es de menor tamaño y potencia la cual ronda los 10 CV, ver figura 47.



FIGURA 48. Motor trifásico asíncrono General Electric FM132MX/4

La tabla 10, muestra una serie de parámetros y características que como en el caso anterior nos permitirán determinar, la tensión máxima a aplicar, el valor mínimo de la resistencia del sistema aislante, como el valor mínimo de I.P. que debería tener una vez finalizadas las pruebas. Este motor se encuentra en condiciones de funcionamiento muy similares a las indicadas en el apartado 4.1.1

Tabla 10. Características y especificaciones motor General Electric FM132MX/4

Motor General Electric FM132MX/4 N0 801355			
Revoluciones (rpm)	1435		
Frecuencia (Hz)	50		
Voltaje estator Δ (V)	380		
Intensidad estator Δ (A)	15.2		
Tipo de aislamiento	Clase E	Temperatura máxima °C	120
		Material aislante	Impregnante o barniz
		Fibras orgánicas sintéticas. Ej. Esmaltes de acetato de polivinilo	Barnices de resinas alquídicas.
Factor de potencia ($\cos \varphi$)	0.80		
Potencia CV/kW	10/7.5		
% FM	C		

4.1.4 MOTOR SIEMENS 1LE10011AB422AH4

Este motor es de tipo asíncrono, se lo ha elegido por el estado en el que se encuentra, el motor es completamente nuevo comprado hace seis años bajo pedido, nunca antes utilizado, se ha encontrado en una atmósfera seca y limpia, además cuenta con un índice de protección IP55, por lo que la posibilidad de que pueda entrar polvo en su interior es baja. Ver figura

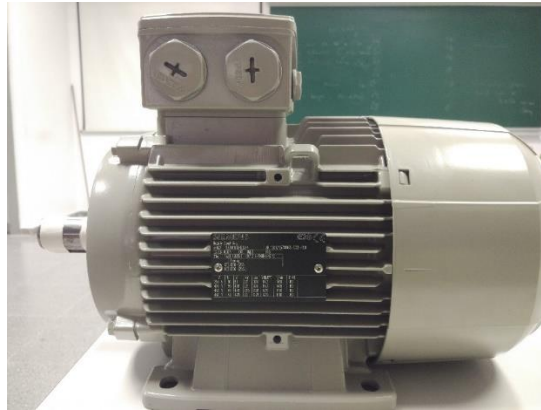


FIGURA 49. Motor trifásico asíncrono Siemens 1LE10011AB422AH4

La tabla 11, muestra una serie de parámetros y características que como en el caso anterior nos permitirán determinar, la tensión máxima a aplicar, el valor mínimo de la resistencia del sistema aislante, como el valor mínimo de I.P. que debería tener una vez finalizadas las pruebas.

Tabla 11. Características y especificaciones Motor Siemens 1LE10011AB422AH4

Motor Siemens 1LE10011AB422AH4			
Revoluciones (rpm)	1455		
Frecuencia (Hz)	50		
Voltaje estator Δ/Y (V)	230/400		
Intensidad estator Δ/Y (A)	8.1/4.65		
Tipo de aislamiento	Clase F	Temperatura máxima °C	155
		Material aislante	Impregnante o barniz
		Esmaltes y barnices a base de: poliéster modificado, poliuretano, poliamida	Barnices y resinas a base poliéster, poliuretano y epóxicas.
Factor de potencia ($\cos \varphi$)	0.81		
Potencia CV/kW	2.99/2.2		
Tamaño	100 L		
Peso (Kg)	21		
Índice de protección (IP)	55	Protección ante cuerpos mayores a 1 mm	
		Chorros de agua en todas las direcciones	

4.1.4 MOTOR SIEMENS 1LA20904AA10

Esta clase de motores son de tipo asíncrono y trifásico, se realizarán las mediciones en 5 motores que poseen estas características, 3 de ellos completos y en funcionamiento, 1 rebobinado y otro con las espiras de sus bobinas rotas, en los cuales sus aislamientos se encuentran completamente expuestos a la intemperie. Ver figura

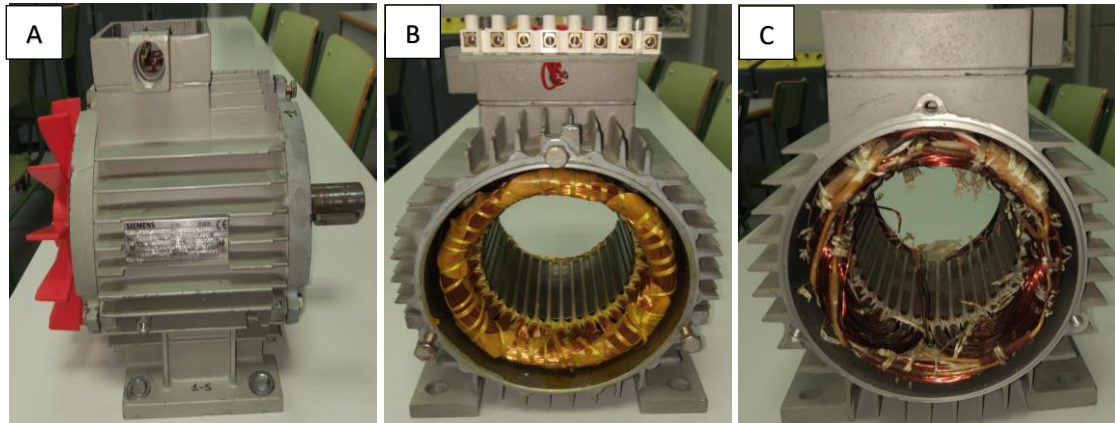


FIGURA 50. Motor Siemens modelo 1LA20904AA10 A) Motor en correcto estado.

B) Motor rebobinado. C) motor con espiras rotas

La tabla 12, muestra una serie de parámetros y características que como en el caso anterior nos permitirán determinar, la tensión máxima a aplicar, el valor mínimo de la resistencia del sistema aislante, como el valor mínimo de I.P. que debería tener una vez finalizadas las pruebas.

Tabla 12. Características y especificaciones motor Siemens 1LA20904AA10

Motor Siemens 1LA2090 4AA10			
Revoluciones (rpm)	1410		
Frecuencia (Hz)	50		
Voltaje estator Δ/Y (V)	230/400		
Intensidad estator Δ/Y (A)	4.6/2.7		
Tipo de aislamiento	Clase F	Temperatura máxima °C	155
		Material aislante	Impregnante o barniz
		Esmaltes y barnices a base de: poliéster modificado, poliuretano, poliamida	Barnices y resinas a base poliéster, poliuretano y epoxicas
Factor de potencia ($\cos \varphi$)	0.80		
Potencia CV/kW	1.5/1.1		
Tamaño	90 S		
Peso (Kg)	21		
Índice de protección (IP)	55	Protección ante cuerpos mayores a 1 mm	
		Chorros de agua en todas las direcciones	

4.1.5 MOTOR SIEMENS 1LA7090 4AA10

Aunque este motor posee unas características idénticas al descritas en el punto 4.1.4, se ha considerado como un caso aislado, pues se desconoce qué instrumentación extra ha sido añadida su estator, a ello se suma que se podría haber sido rebobinado, ya que no se tiene registro de que pruebas han sido realizadas en él.

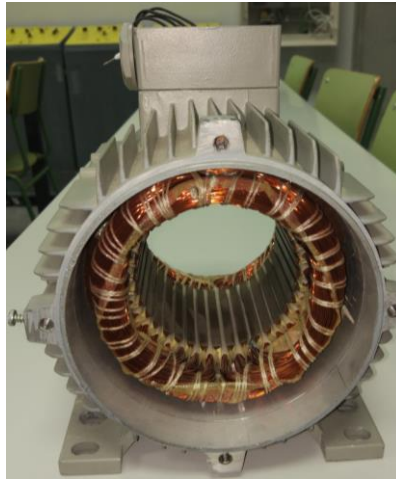


FIGURA 51. Motor Siemens 1LA7090 4AA10

La tabla 13, muestra una serie de parámetros y características que como en el caso anterior nos permitirán determinar, la tensión máxima a aplicar, el valor mínimo de la resistencia del sistema aislante, como el valor mínimo de I.P. que debería tener una vez finalizadas las pruebas.

Tabla 13. Características y especificaciones del Motor siemens 1LA7090 4AA10

Motor Siemens 1LA7090 4AA10			
Revoluciones (rpm)	1415		
Frecuencia (Hz)	50		
Voltaje estator Δ/Y (V)	230/400		
Intensidad estator Δ/Y (A)	4.4/2.55		
Tipo de aislamiento	Clase F	Temperatura máxima °C	155
		Material aislante	Impregnante o barniz
		Esmaltes y barnices a base de: poliéster modificado, poliuretano, poliamida	Barnices y resinas a base poliéster, poliuretano y epoxicas
Factor de potencia ($\cos \varphi$)	0.81		
Potencia CV/kW	1.5/1.1		
Tamaño	90 S		
Peso (Kg)	21		
Índice de protección (IP)	55	Protección ante cuerpos mayores a 1 mm	
		Chorros de agua en todas las direcciones	

4.1.6 MOTOR ZALDI

Este motor se lo ha elegido por el deterioro que presenta como la presencia de espiras rotas en su devanado, además se puede observar que algunas partes del sistema aislante se encuentra deteriorado por lo que se prevé que dé como resultado un índice de polarización bajo.

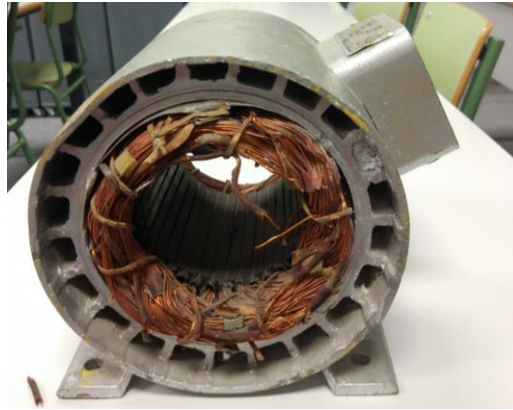


FIGURA 52. Motor Zaldi

La tabla 13, muestra una serie de parámetros y características que como en el caso anterior nos permitirán determinar, la tensión máxima a aplicar, el valor mínimo de la resistencia del sistema aislante, como el valor mínimo de I.P. que debería tener una vez finalizadas las pruebas.

Tabla 14. Características y especificaciones del motor Zaldi

Motor ZALDI			
Revoluciones (rpm)	1400		
Frecuencia (Hz)	50		
Voltaje estator Δ/Y (V)	220/380		
Intensidad estator Δ/Y (A)	6.3/3.7		
Tipo de aislamiento	Clase	Temperatura máxima °C	
		Material aislante	Impregnante o barniz
Factor de potencia ($\cos \varphi$)	-		
Potencia CV/kW	2.02/1.49		
Tamaño	-		
Peso (Kg)	-		
Índice de protección (IP)	-	-	-
		-	-

4.2 MEGGER MIT 1025

El equipo con el cual se realizará cada una de las pruebas será el Megger Mit 1025 Figura 46, el cual es un instrumento de medición construido especialmente para comprobar el estado en el cual se encuentra el sistema aislante de una máquina o instalación.



FIGURA 53. MEGGER MIT 1025

Este instrumento es fácil y sencillo de manejar, una de las ventajas que posee frente a otros presentes en el mercado es la posibilidad de realizar las pruebas mientras se encuentra conectado a la red eléctrica por lo que su tiempo de carga será menor, evitando un tiempo de parada innecesario de una máquina analizada.

Por otro lado, permite guardar los datos adquiridos los cuales pueden ser descargados a través de una memoria extraíble o pueden ser importados a través de un ordenador mediante su software comercial PowerDB, obteniendo mediante el, una serie de curvas de corriente, resistencia, tiempo facilitando un mejor diagnóstico e interpretación de la información obtenida. Ver figura

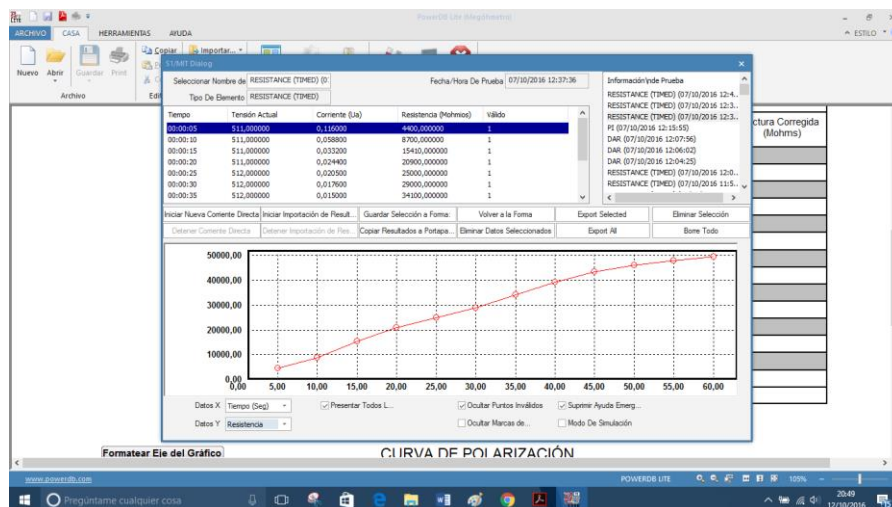


FIGURA 54. Curva de resistencia del aislamiento obtenida a través del software Power DB

Adicionalmente a lo anterior descrito este instrumento permite ajustar los tiempos como el voltaje de aplicación en cada prueba en caso de requerir aplicar alguna tensión diferente a la establecida por la norma IEEE 43:2013

En la tabla se muestra una serie de características y especificaciones respecto al MIT 1025

Voltaje de entrada	90-264 V rms, 47/63 Hz, 100 VA
Tiempo de vida de la batería	4.5 horas
Tiempo de carga de la batería	2.5 horas
Peso	4.5 kg
Dimensiones	315 x 285 x 181 mm
Tipos de prueba	IR, IR(t), D.A.R., I.P., STEP, RAMPA
Voltajes de pruebas	500 V- 10000 V
Voltajes de prueba definidas por el usuario	1 kV -10 kV en pasos de 25 V
Rango del temporizador	Hasta 99 min
Capacidad de memoria	33 PI o 350 IR
Rango del voltímetro	30V-60V CA o CC 50/60 Hz
Precisión de medición del voltímetro	$\pm 3\%$, $\pm 3V$
Rango de medición de la resistencia	10K Ω -20 T Ω
Precisión de medición de la resistencia	5%-20% depende del voltaje aplicable
Rango de medición de la capacitancia	10 nF a 25nF
Precisión de medición de la capacitancia	$\pm 10\%$, $\pm 5nF$
Rango de la corriente	0.01 nA a 6 mA
Precisión de medición de la corriente	$\pm 2\%$, $\pm 0.5 nA$
Rango de visualización analógico	100 K Ω a 10 T Ω
Rango de visualización digital	10 K Ω a 20 T Ω
Alarma de aislamiento	100 K Ω a 20 G Ω
Protección	IP65
Temperatura de funcionamiento	-20 a 50 $^{\circ}C$

V. RESULTADOS

5.1 Motor asíncrono Indar

Se llevó a cabo tres tipos de ensayos sobre los motores Indar 11385 y 11381 como son la prueba de resistencia de aislamiento la prueba de absorción dieléctrica y la determinación de su índice de polarización (P.I.).

La tensión de prueba aplicada a los tres motores se la realiza en función de norma IEEE-43-2013 la cual establece una tensión de prueba de 500 V en corriente continua para motores menores a una tensión de línea de 1000 V en corriente alterna.

5.1.1 Resistencia de aislamiento

En las figuras 55 y 56, se puede observar las gráficas obtenidas de la resistencia del aislamiento de los motores Indar 11385 y 11385 respectivamente, al aplicar la tensión de 500V por el tiempo de un minuto. En estas gráficas previamente se ha realizado la corrección de su temperatura a 40 °C aplicando el factor de conversión obtenido mediante la ecuación 5.1, establecida por la norma IEEE 43-2013 cuando la temperatura ronda los 10 °C < T < 40 °C, adicional a ello se puede hacer uso de las gráficas descritas en la figura 38 para la determinación de este parámetro.

$$k_t = e^{-1245 * (\frac{1}{T+273} + \frac{1}{313})} \quad (5.1)$$

$$k_t = e^{-1245 * (\frac{1}{T+273} + \frac{1}{313})} = 0.84$$

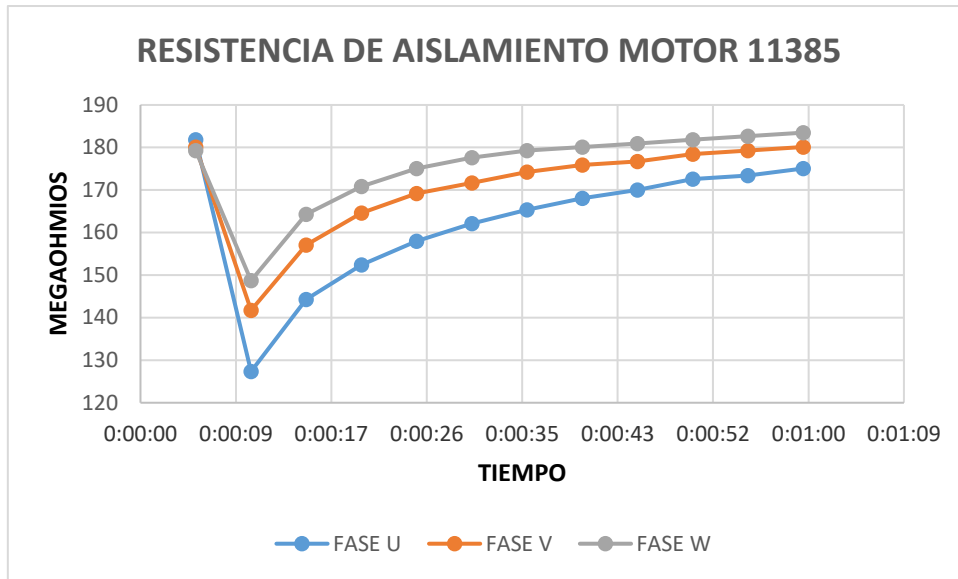


FIGURA 55. Resistencia del aislamiento entre cada fase y tierra en el motor asincrónico Indar 11385 corregido a 40 grados.

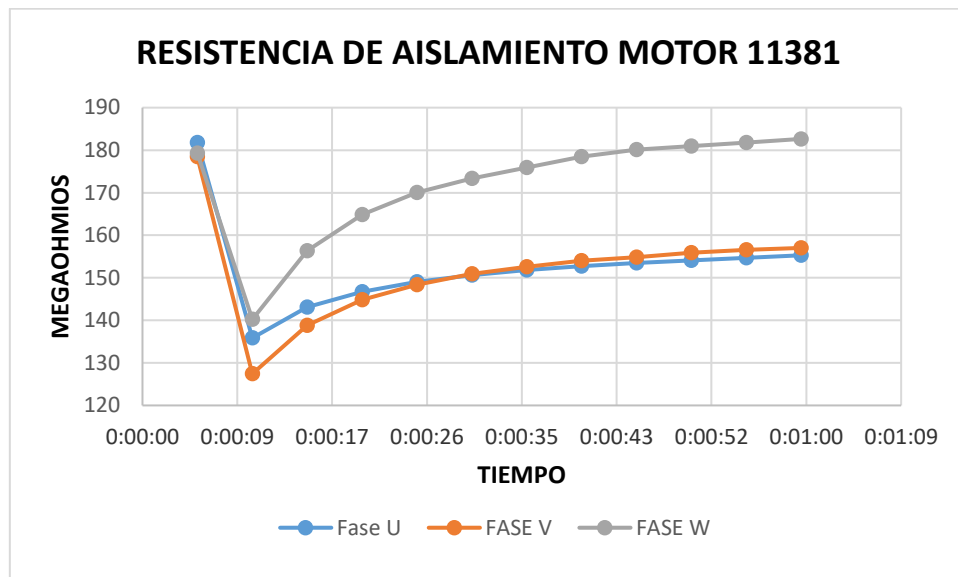


FIGURA 56. Resistencia del aislamiento entre cada fase y tierra en el motor asincrónico Indar 11381 corregido a 40 grados.

Al no constar con historial de la resistencia de aislamiento de las máquinas, no se puede saber con exactitud si su aislamiento ha descendido o no con el paso de los años, por lo que únicamente se podría realizar una comparación entre los valores de un motor con respecto a otro de su mismo tipo y en condiciones similares de funcionamiento.

Al comparar la gráfica de la resistencia de aislamiento de los motores entre sí, lo primero que resalta a la vista es la existencia de la caída alrededor de 30 megohmios resistencia en las fases ‘u’ y ‘v’ del motor 11381 con respecto a las del motor 11385, lo que podría ser un indicativo del inicio del deterioro del dieléctrico.

En un aislamiento seco y en buenas condiciones su resistencia aumenta conforme se incrementa el tiempo de la tensión aplicada alcanzando un valor bastante aproximado a los 10 o 15 minutos, en la figura 55 como 56 se observa que las pendientes de las curvas son bajas por lo que el valor de su resistencia se estabilizara a los pocos minutos lo que nos podría indicar la existencia de humedad y suciedad.

Un valor adicional a estudiar es la resistencia mínima que deberían poseer estos motores, la resistencia más bajo obtenido en las fases de estos motores se sitúa alrededor de los 150 Megohmios para el motor 11381. La norma IEEE 43-2013 establece un mínimo de 100 Megohmios Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970.

5.1.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)

Los valores obtenidos realizando la prueba DAR a los motores 11381 y 11385 se muestran en la tabla 1, en esta prueba se ha prescindido de las gráficas ya que estas son muy similares a los obtenidos en el punto 5.1.1. este valor se lo determina aplicando una tensión de 500V a cada una de las fases y tomando los valores de resistencia a los 30s y 1 min, después de haber iniciado la prueba

Tabla 15. Valores de resistencia de absorción dieléctrica de cada una de las fases en los motores asincrónicos Indar 11381 y 13385

MOTOR ASÍNCRONO 11385					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	162	175	1,079	1.25	Deficiente
Fase v	171	180	1,049	1.25	Deficiente
Fase w	177	183	1,033	1.25	Deficiente
MOTOR ASÍNCRONO 11381					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	150	155	1.03	1.25	Deficiente
Fase v	150	157	1.04	1.25	Deficiente
Fase w	173	182	1.05	1.25	Deficiente

Se puede observar que el valor más alto de D.A.R. corresponde a la fase “u” del motor 11385, pero este valor resulta bajo al compararlo con mínimo recomendado por lo que se puede decir que ambos motores poseen un aislamiento que podría encontrarse húmedo y contaminado lo cual concuerda con las condiciones ambientales existentes en la ciudad Valencia la cual se sitúa en torno al 70% de humedad relativa anual. [46]

5.1.3 Índice De Polarización

Para esta prueba se realizó conectando las tres fases en estrella y aplicando una tensión de 500 voltios a sus devanados. En figura 57 se puede observar las curvas obtenidas durante el ensayo, que permitirán determinar el índice de polarización de estos motores, a diferencia de la prueba D.A.R. en cual se toman únicamente los valores puntuales obtenidos a 1 minuto y 30 segundos, aquí se considera las variaciones presentes en la curva y adicionalmente a ellos los valores puntuales a 1 minuto y 10 minutos con los cuales se pretende determinar el estado en el cual se encuentra el aislamiento.

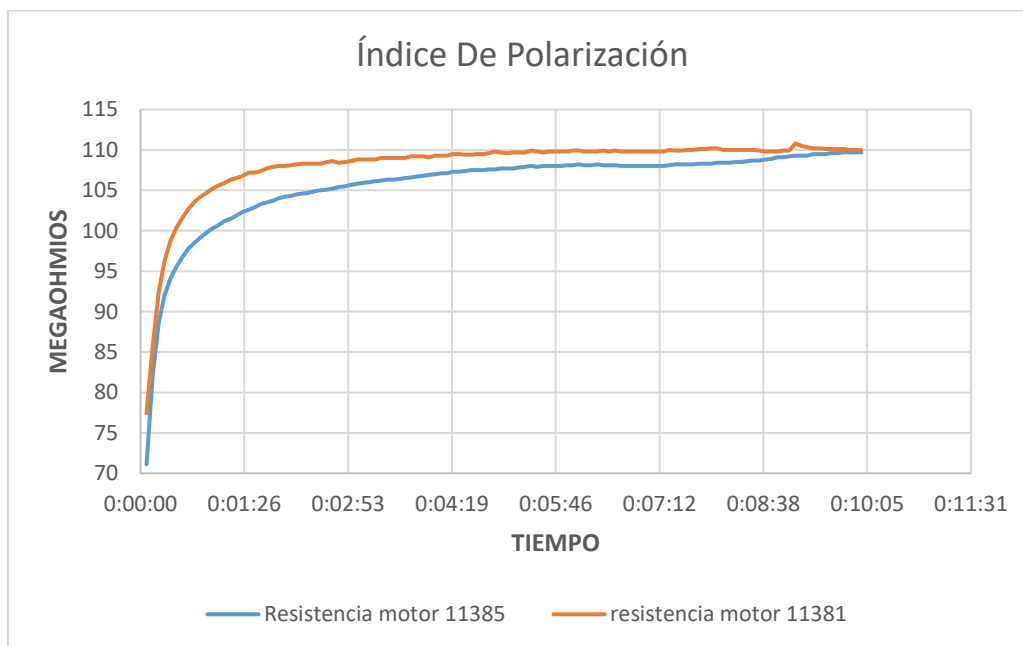


FIGURA 57. Curva de índice de polarización de los motores asíncronos Indar 11385 y 11381.

Al comparar la curva de resistencia del aislamiento entre los motores, destaca a primera vista, que la pendiente descrita por el motor 11385 es mayor a la pendiente descrita por el motor 11381, esta variación se debe principalmente a la mejor condición de resistencia que presenta sus fases, así mismo este motor podría encontrarse con menor suciedad o humedad.

En la tabla 16, se muestran los valores obtenidos del I.P., para determinar cuál debería ser su valor recomendable, es necesario conocer el tipo de aislamiento que poseen estos motores. Para ello nos basaremos en la información disponible en la tabla 8, obtenidas de la placa de características, donde se describe que estos motores poseen un aislamiento clase B los cuales deberían presentar un valor mínimo de I.P. de 2.0. según IEEE 43-2013.

Tabla 16. Valores de índice de polarización en una conexión estrella- tierra en los motores asincrónicos Indar 11381 y 13385

MOTOR ASINCRONO 11385					
CONEXION	Resistencia 1 min	Resistencia 10 min	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	100.3	109.7	1,093	2.0	Deficiente
MOTOR ASINCRONO 11381					
CONEXION	Resistencia 1 min	Resistencia 10 min	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	105.2	110	1.045	2.0	Deficiente

De la tabla 16, se determina que el valor máximo del IP es de 1.093 en el motor 11385 muy por debajo del valor mínimo 2.0 que establece la norma IEEE 43-2013 para este tipo de aislamiento. Analizando los resultados obtenidos con los expuestas en la resistencia de aislamiento, como su valor D.A.R, se establece motor se encuentra contaminado, adicionalmente a ello la pendiente de la curva de resistencia de aislamiento en los tres ensayos es muy por lo que los aislamientos de los motores deben presentar un cierto grado de humedad tanto interior como exterior.

Para asegurarnos que el diagnóstico realizado es correcto, se ha procedido a observar el interior de uno de estos motores, en la figura 58, se puede ver como en su interior existe un alto grado de suciedad la cual puede absorber una cierta cantidad de humedad disminuyendo de esta forma la resistencia de aislamiento, dando como resultados valores bajos de los ensayos en todas las pruebas realizadas. Cabe recalcar que estos motores jamás han recibido mantenimiento por lo que no resulta extraña su condición.



FIGURA 58. Inspección del estado interno interna del motor 11381

5.2 Motor Síncrono Indar

Se llevó a cabo tres tipos de ensayos sobre los motores síncronos Indar 11384, 11382 y 13380 como son la prueba de resistencia de aislamiento la prueba de absorción dieléctrica y la determinación de su índice de polarización (P.I.).

La tensión de prueba aplicada a los tres motores se la realiza en función de norma IEEE-43-2013 de forma muy similar a la establecida el punto 5.1 para este caso igualmente de 500V

5.2.1 Resistencia de aislamiento

En las figuras 59 se puede observar las gráficas obtenidas de la resistencia del aislamiento de los tres motores síncronos Indar, al aplicar la tensión de 500V por el tiempo de un minuto. En estas gráficas previamente se ha realizado la corrección de su temperatura de forma muy similar a la establecida en el punto 5.1.1 que para este caso también el coeficiente K_t resulta ser de 0.84 a 27 °C.

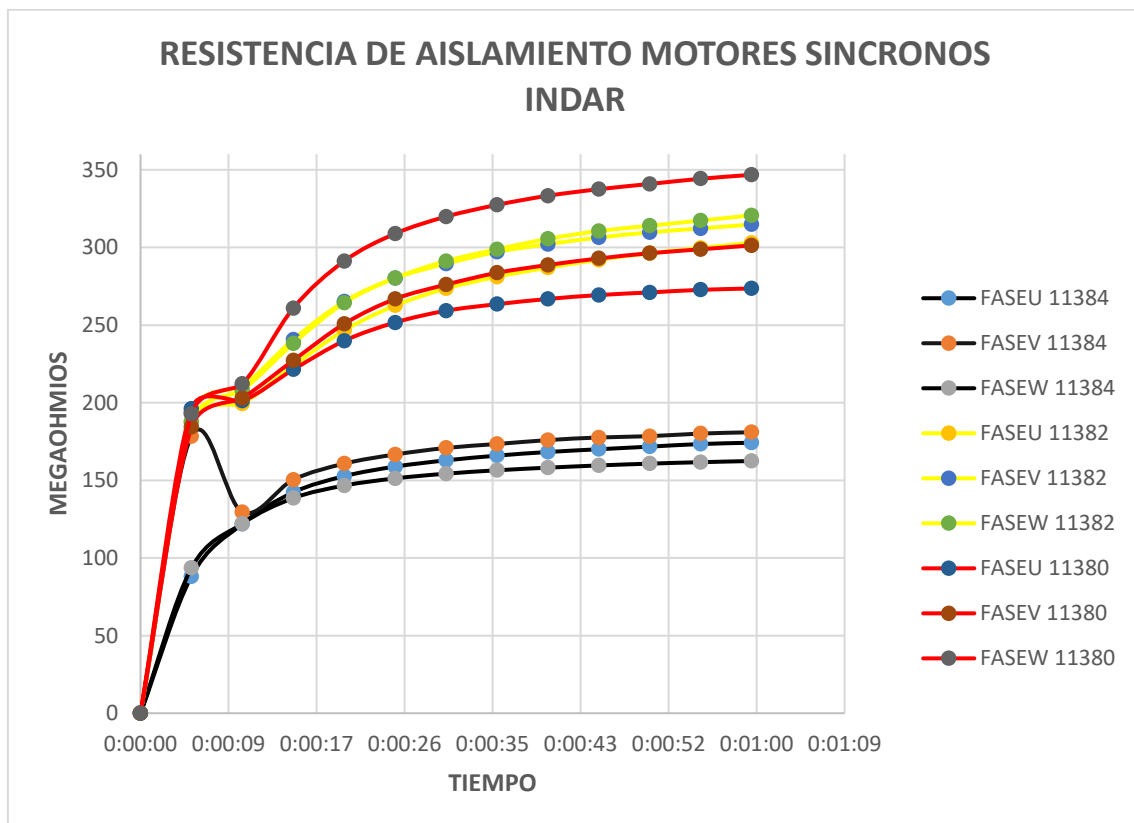


FIGURA 59. Resistencia del aislamiento entre cada fase y tierra en los motores síncronos Indar 11384 11382 11380 corregido a 40 grados

Al comparar la gráfica de la resistencia de aislamiento de los motores entre sí, lo primero que resalta a la vista es la existencia de la caída alrededor de 150 megohmios en las tres fases del motor 11384 con respecto a las de los motores 11382 y 11380 de los cuales sus fases ronda 310 megohmios.

Adicionalmente a ello se observa que las pendientes de la curva de la resistencia de aislamiento del motor 11384 son bajas comparándolas con las de las curvas de los otros dos motores. Por lo que el valor de su resistencia se estabilizara a los pocos minutos lo que nos podría indicar la existencia de mayor humedad y suciedad en este motor.

Un valor adicional a estudiar es la resistencia mínima que deberían poseer estos motores, la resistencia más baja obtenido en las fases de estos motores se sitúa alrededor de los 160 Megohmios para el motor 11384, correspondiente al caso más crítico. La norma IEEE 43-2013 establece un mínimo de 100 Megohmios Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970.

5.2.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)

Los valores obtenidos realizando la prueba DAR a los motores 11384, 11382 y 11380 se muestran en la tabla 1, la prueba se la realizado de idéntica forma descrito al punto 5.1.2 tanto en valor de tensión como de tiempo.

Tabla 17. Valores de resistencia de absorción dieléctrica de cada una de las fases en los motores sincrónicos Indar 11382, 11384 y 11380

MOTOR SINCRONO 11384					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	162.86	1724.22	1.069	1.25	Deficiente
Fase v	170.85	180.95	1.059	1.25	Deficiente
Fase w	154.27	162.44	1.052	1.25	Deficiente
MOTOR SINCRONO 11382					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	273.54	303	1.1076	1.25	Deficiente
Fase v	289.53	314.78	1.0872	1.25	Deficiente
Fase w	291.21	320.677	1.1011	1.25	Deficiente
MOTOR SINCRONO 11380					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	259.23	273.54	1.0551	1.25	Deficiente
Fase v	276.06	301.31	1.0971	1.25	Deficiente
Fase w	319.86	346.76	1.0842	1.25	Deficiente

Se puede observar que el valor más alto de D.A.R. corresponde a las fases ‘u’ y ‘w’ del motor 11382, pero estos valores resultan bajos al compararlo con mínimo recomendado por lo que se puede decir que tres motores poseen un aislamiento que podría encontrarse húmedo y contaminado, adicionalmente a ello se observa que los valores más bajos de D.A.R. corresponden al motor 11384 debido a su bajo resistencia de aislamiento y pendiente de curva.

5.2.3 Índice De Polarización

Esta prueba se realizó conectando las tres fases en estrella y aplicando una tensión de 500 voltios a sus devanados. En figura 60 se puede observar las curvas obtenidas durante el ensayo.

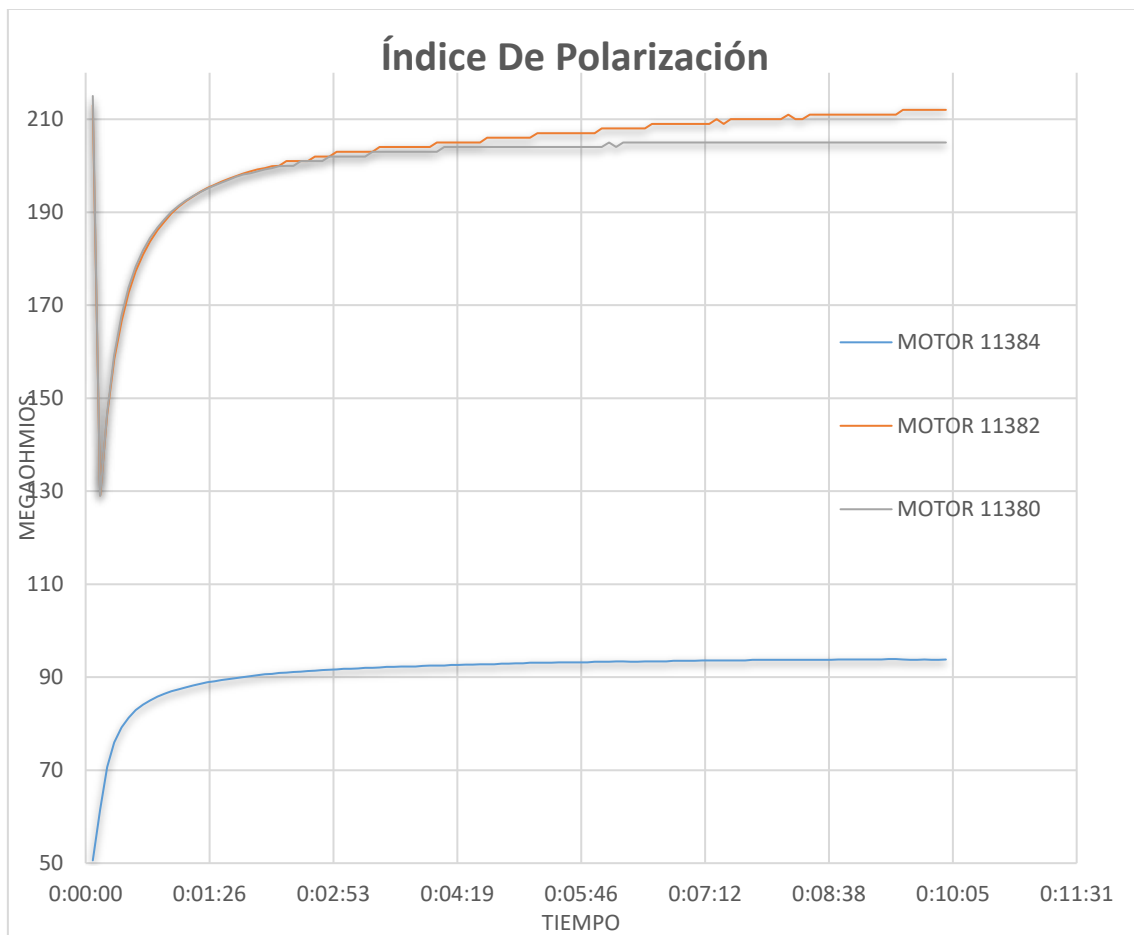


FIGURA 60. Curva de índice de polarización de los motores síncronos Indar 11384, 11382 y 11380.

Al comparar las curvas obtenidas al realizar la prueba del I.P. entre los motores, destaca a primera vista, la curva del motor 11384, encontrándose muy por debajo con relación a los otros motores, como se ha mencionado anteriormente producto de su baja resistencia de aislamiento por contaminación y humedad. No obstante, la pendiente de la curva en

la prueba I.P. del motor 11384 es muy similar a la del motor 11380, esto se debe a que el motor 11380 si bien no presente una resistencia de aislamiento baja, la variación de la resistencia entre sus fases es considerable, a diferencia de la del motor 11382 cuya resistencia de sus fases se encuentran muy próximas entre sí, ver figura 59.

El motor 11384 y 11380 estabilizan la resistencia de aislamiento a los pocos minutos por lo que su humedad y suciedad es mayor a la del motor 11382. La pendiente descrita por el motor 11382 es mayor a la pendiente descrita por los otros dos motores, esta variación se debe principalmente a la mejor condición de resistencia que presenta sus fases.

En la tabla 18, se muestran los valores obtenidos del I.P., para determinar cuál debería ser su valor recomendable, es necesario conocer el tipo de aislamiento que poseen estos motores. Para ello nos basaremos en la información disponible en la tabla 9, obtenidas de la placa de características, en la que se describe que estos motores poseen un aislamiento clase B por lo tanto el valor mínimo de I.P. sería de 2.0. según IEEE 43-2013.

Tabla 18. Valores de índice de polarización en una conexión estrella- tierra en los motores sincrónicos Indar 11381 y 13385

MOTOR ASINCRONO 11384					
CONEXION	Resistencia 1 min	Resistencia 10 min	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	87	93	1,06	2.0	Deficiente
MOTOR ASINCRONO 11382					
CONEXION	Resistencia 1 min	Resistencia 10 min	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	189.80	212	1.11	2.0	Deficiente
MOTOR ASINCRONO 11380					
CONEXION	Resistencia 1 min	Resistencia 10 min	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	190.10	205	1.07	2.0	Deficiente

De la tabla 18, se determina que el valor máximo del IP es de 1.11 en el motor 11382, muy por debajo del valor mínimo 2.0 que establece la norma IEEE 43-2013 para este tipo de aislamiento. Analizando los resultados obtenidos en los tres ensayos se deduce que los aislamientos de los motores deben presentar un cierto grado de humedad en su sistema aislante.

Para asegurarnos que el diagnóstico realizado es correcto, se ha procedido a observar el interior de cada uno de estos motores, en la figura 61, se puede ver como en su interior existe un alto grado de suciedad la cual puede absorber una cierta cantidad de humedad disminuyendo de esta forma la resistencia de aislamiento, dando como resultados valores bajos de los ensayos en todas las pruebas realizadas. Cabe recalcar que estos motores jamás han recibido mantenimiento por lo que no resulta extraño su condición.

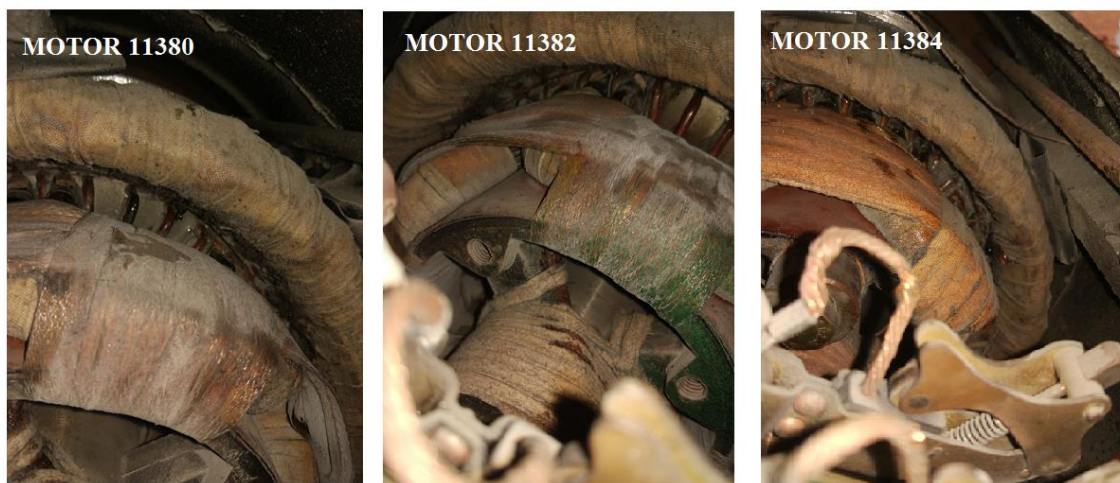


FIGURA 61. Inspección del estado interno interna del motor 11380,11382,11384

5.3 Motor Siemens Asíncrono 1LA20904AA10

Se llevó acabo tres tipos de ensayos sobre los 5 motores asíncrono modelo 1LA20904AA10 como son la prueba de resistencia de aislamiento la prueba de absorción dieléctrica y la determinación de su índice de polarización (P.I.)

Los motores analizados se encuentran de diferente condición en la tabla 19 se describe cada uno, su estado y el color con el cual se representará su gráfica de resistencia de aislamiento en la figura 62.

Tabla 19. Estado de cada motor tipo 1LA2004AA10

NÚMERO DE MOTOR	ESTADO	COLOR GRÁFICA 62
2124655	Con rotor-funcionando	Negro
2124669	Con rotor-funcionando	Azul
2124590	Con rotor-funcionando	Verde
2124610	Rebobinado sin rotor	Café
2124593	Sin rotor bobina rota	Rojo

La tensión de prueba aplicada a los tres motores se la realiza en función de norma IEEE-43-2013 de forma muy similar a la establecida el punto 5.1 para este caso igualmente de 500V

5.3.1 Resistencia de aislamiento

En las figuras 62 se puede observar las gráficas obtenidas de la resistencia del aislamiento de los 5 motores s al aplicar la tensión de 500V por el tiempo de un minuto. En estas gráficas previamente se ha realizado la corrección de su temperatura de forma muy similar a la establecida en el punto 5.1.1 el coeficiente K_t resulta ser de 0.84 a 27 °C.

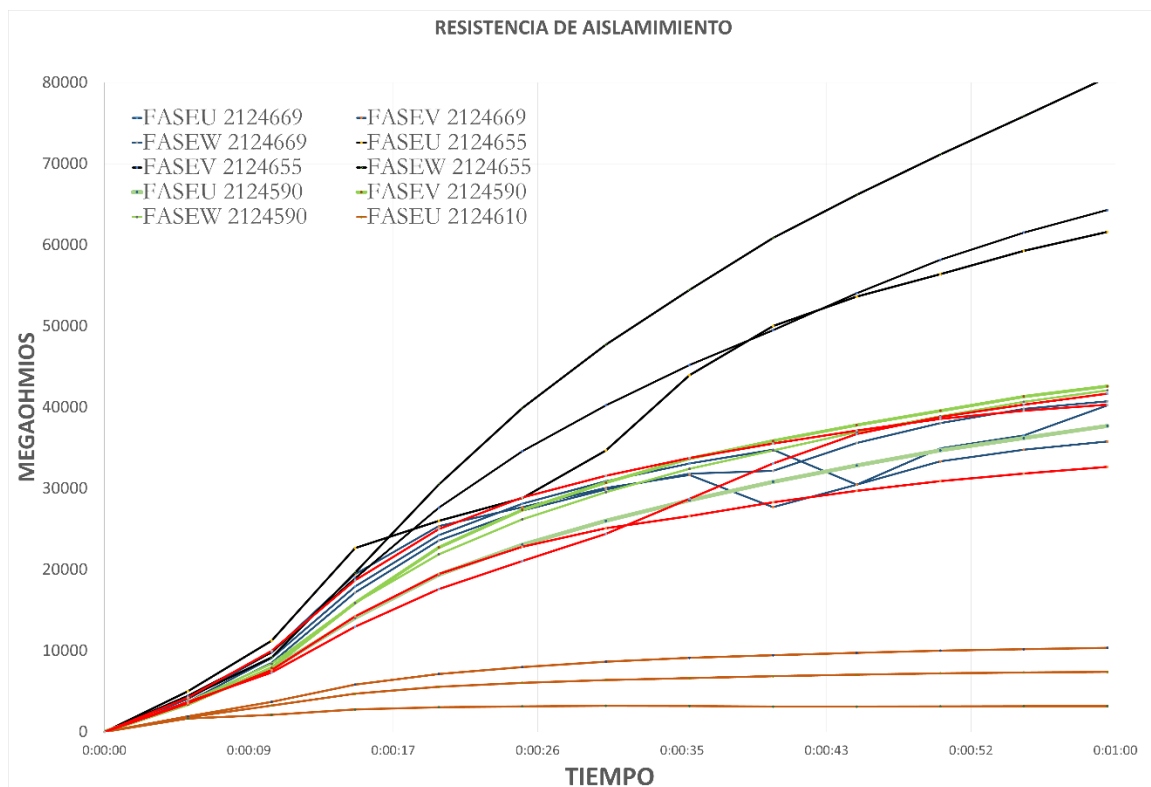


FIGURA 62. Resistencia del aislamiento entre cada fase y tierra en los motores asíncronos ILA2004AA10 corregidos a 40 grados

Al comparar las gráficas de la resistencia de aislamiento de los motores, destacan dos características, la primera es que uno de ellos presenta una resistencia muy alta a los demás, correspondiente al motor 2124655, que es un motor en funcionamiento con rotor y que se encuentra sellado, por el otro lado tenemos el motor 2124610 que es un motor rebobinado, el resto de motores incluso el que posee su bobinado con espiras rotas se encuentran en un rango de 30 a 40 Gigaohmios.

La principal diferencia entre estas variaciones se debe a las pruebas a las que ha sido sometidos estos motores a lo largo de su vida útil. Al comparar los tres motores con

rotor, los cuales se encuentran en funcionamiento, encontramos que el motor 2124590 se han sometido en un corto tiempo a una serie de arranques por lo que su aislamiento se pudo haber fragilizado, por lo que sus curvas de resistencia representadas de color verde en la figura 62, presentan una resistencia menor a la del motor 2124655, sobre el cual no se han realizado pruebas rigurosas. Por otro lado, el motor 2124669 ha sido sometido a fallas generadas por demostración didáctica en el proceso de enseñanza, es por ello que sus curvas de resistencia representadas de color azul en la gráfica 62, presenten pequeñas irregularidades.

Resulta interesante estudiar las curvas de resistencia de aislamiento entre los motores 2124610 que es rebobinado y 2124593 que posee espiras rotas, por el motivo de que el motor con espiras rotas tiene una resistencia de aislamiento similar a los motores 2124669 y 212459 y superior a la del motor 2124610, ver curvas de color rojo en gráfica 62, posiblemente se deba a que la resistencia de su aislamiento se encuentre en buen estado pese a que se encuentra a la intemperie, sumado a ello, que únicamente se esté midiendo el tramo en el cual exista continuidad. Por otro lado, la baja resistencia del motor 2124610 se debería a un mal proceso del trabajo realizado durante el rebobinado. Ver curvas de color café en la figura 62.

Adicionalmente a ello se observa que las pendientes de la curva de la resistencia de aislamiento del motor 2124610 son bajas comparándolas con las de las curvas de los otros dos motores. Por lo que el valor de su resistencia se estabilizara a los pocos minutos lo que nos podría indicar la existencia suciedad debido a que su estator se encuentra también a la intemperie, aunque se deba mayormente a su rebobinado defectuoso.

Un valor adicional a estudiar es la resistencia mínima que deberían poseer estos motores, la resistencia más baja obtenido en las fases de estos motores se sitúa alrededor de los 7950 Megohmios para el motor 2124610, correspondiente al caso más crítico. La norma IEEE 43-2013 establece un mínimo 100 Megohmios Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970.

5.3.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)

Los valores obtenidos realizando la prueba DAR a los motores siemens 1LA20904AA10 se muestran en la tabla 20, la prueba se la realizado de idéntica forma descrito al punto 5.1.2 tanto en valor de tensión como de tiempo.

Tabla 20. Valores de resistencia de absorción dieléctrica de cada una de las fases en los motores asíncronos siemens 1LA20904AA10

MOTOR ASÍNCRONO 2124655					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	34676	61610	1.7766	1.25	Excelente
Fase v	40231	64303	1.5983	1.25	Excelente
Fase w	47722	80632	1.6895	1.25	excelente
MOTOR ASÍNCRONO 2124699					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	30889	40231	1.3024	1.25	Bueno
Fase v	30047	35771	1.2005	1.25	Deficiente
Fase w	29879	40736	1.3633	1.25	Bueno
MOTOR ASÍNCRONO 2124590					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	26007	37706	1.4498	1.25	Bueno
Fase v	30721	42588	1.3863	1.25	Bueno
Fase w	29542	42083	1.4245	1.25	Bueno
MOTOR ASÍNCRONO 2124610					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	6379	7398	1.15	1.25	Deficiente
Fase v	8643	10344	1.19	1.25	Deficiente
Fase w	3215	3173	0.98	1.25	Deficiente
MOTOR ASÍNCRONO 2124593					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	24408	41662	1.7068	1.25	Excelente
Fase v	25081	32656	1.3020	1.25	Bueno
Fase w	31562	40316	1.2773	1.25	Bueno

Se puede observar que el valor más alto de D.A.R. corresponde a las fases del motor 2124655, el cual posee una condición de excelente sobre los otros motores al compararlo sobre su valor mío. De igual manera se puede observar que el valor mar bajo de D.A.R. corresponde a las fases del motor 2124610 que posee el estator rebobinado, por lo que se confirma que su aislamiento es deficiente debido al proceso mismo que ha sufrido más que por la suciedad que presenta. Aunque el motor 2124593 posee espiras rotas no se encuentra se puede decir que su aislamiento no se encuentra ni húmedo ni contaminado por su pendiente de curva y valores D.A.R.

5.3.3 Índice De Polarización

Esta prueba se realizó conectando las tres fases en estrella y aplicando una tensión de 500 voltios a sus devanados. Pese a que estos motores no se les deberían realizar este tipo de prueba debido a la alta resistencia que presenta sus devanados superiores a los 5 Gigaohmios, resulta interesante ver la evolución de la resistencia de aislamiento en el tiempo. En figura 63 se puede observar las curvas obtenidas durante el ensayo.

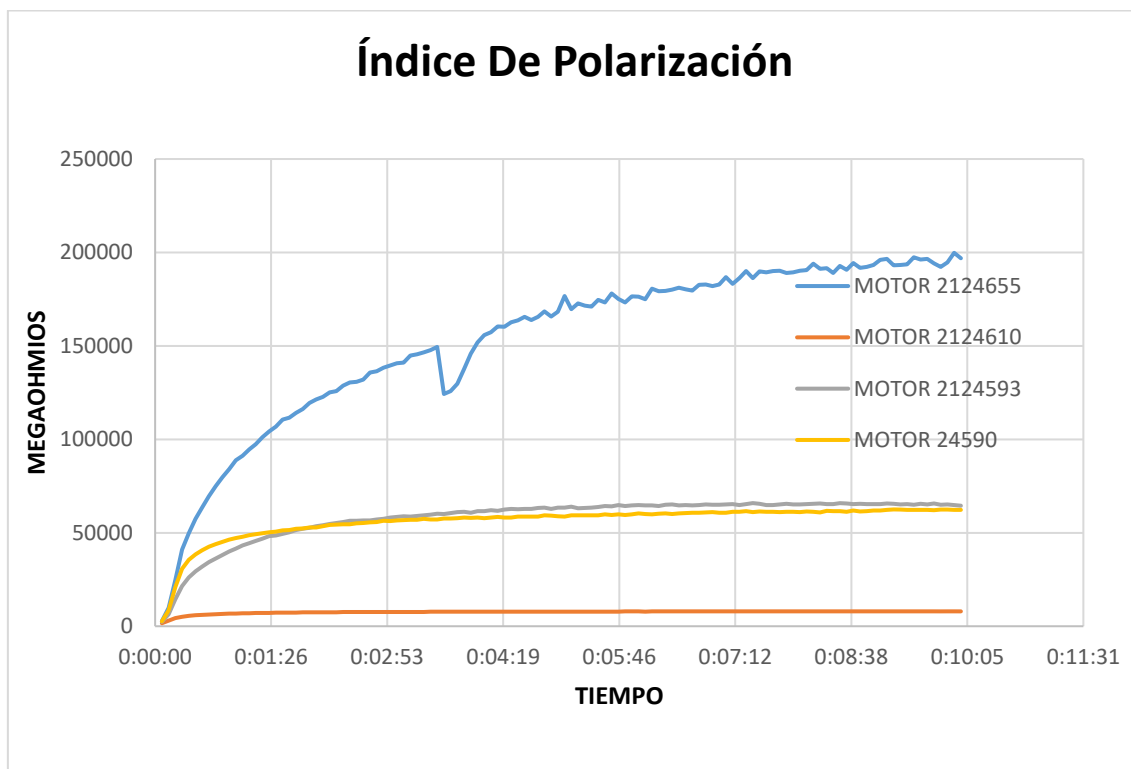


FIGURA 63. Curva de índice de polarización de los motores asíncronos siemens ILA2004AA10.

Al comparar las curvas obtenidas al realizar la prueba del I.P. entre los motores, destaca a primera vista, la curva del motor 2124610, encontrándose muy por debajo en relación a los otros motores, como se ha mencionado debido a una falla en el rebobinado del motor. No obstante, la pendiente descrita por tres motores que se les ha realizado el P.I es baja, se podría atribuir esta característica a la rápida polarización de estos motores, pero, por otro lado, el motor 2124655 describe una curva con una pendiente elevada, aumentando su resistencia conforme avanza el tiempo, por lo que la rápida polarización de estos motores quedaría descartada de comprobarse esto, en motores similares.

Como los valores de referencia de I.P. según la norma IEEE 43-2013 no son aplicables debido a la alta resistencia de aislamiento que presentan este tipo de motores, por lo que no podríamos asegurar que estos motores se encuentran contaminado o húmedos, pero sí podemos afirmar que han sufrido algún tipo de degradación con el avance del tiempo.

Se esperaba que su pendiente del motor 2124610 aumente a medida que pase el tiempo, y que el motor 2124610 con espiras rotas que se espera que presente un comportamiento inusual en su curva, pero para nuestra sorpresa el motor rebobinado resulto estabilizándose a los pocos minutos, mientras que el motor con espiras rotas presento un comportamiento normal, indicando que no existe ningún de deterioro grave sobre él.

En la tabla 21, se muestran los valores obtenidos del I.P., comparándolos con el valor mínimo necesario que deberían poseer si se los evaluara bajo la norma, por tanto, es necesario conocer el tipo de aislamiento que poseen estos motores. Para ello nos basaremos en la información disponible en la tabla 12, obtenidas de sus placas de características, en la que se describe que estos motores poseen un aislamiento clase F por lo tanto el valor mínimo de I.P. sería de 2.0. Según IEEE 43-2013.

Tabla 21. Valores de índice de polarización en una conexión estrella- tierra en los motores asíncronos siemens 1LA2004AA10.

MOTOR ASÍNCRONO 2124655					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min MΩ	Resistencia 10 min MΩ	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	88900	196900	2.2148	2.0	Bueno
MOTOR ASÍNCRONO 2124610					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min MΩ	Resistencia 10 min MΩ	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	6819	7950	1.1656	2.0	Deficiente
MOTOR ASÍNCRONO 2124593					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min MΩ	Resistencia 10 min MΩ	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	41600	64500	1.5504	2.0	Deficiente
MOTOR ASÍNCRONO 2124590					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min MΩ	Resistencia 10 min MΩ	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	47200	62300	1.31	2.0	Deficiente

De la tabla 21, se determina que el valor máximo del IP es de 2.21 en el motor 2124655, siendo el único motor de los 4 a los que se les ha realizado este tipo de prueba que pasaría siendo evaluado bajo la norma IEEE 43-2013, el resto de motores presenta un I.P. inferior a 1.16 el cual resultaría deficiente si estos motores no poseyeran una alta resistencia de aislamiento.

Para asegurarnos que el diagnóstico realizado es correcto, en las figuras 64 se indican el estado en el cual se encuentran el estator de alguno de estos motores de los motores más críticos.

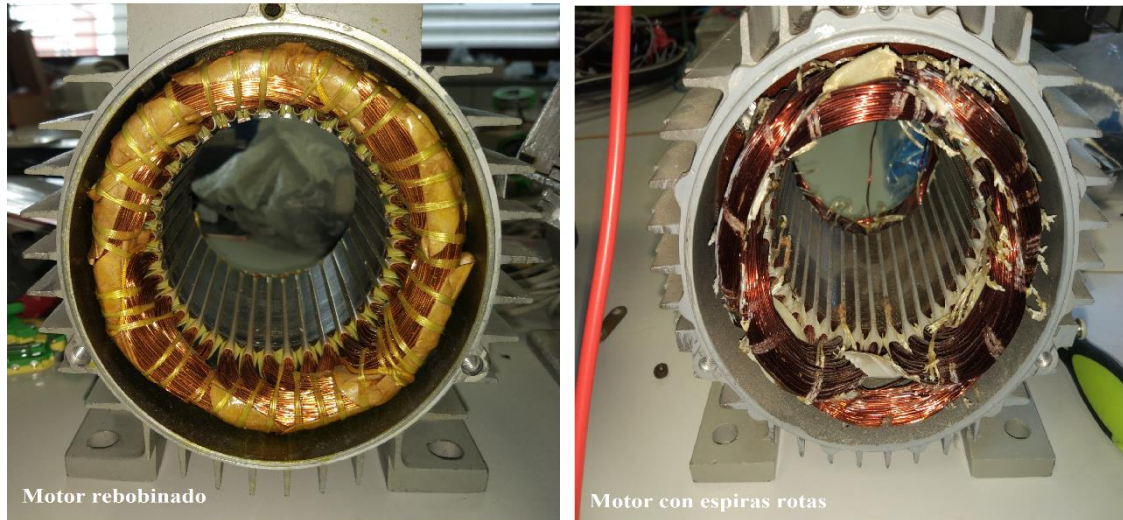


FIGURA 64. Estado actual de los motores 2124610 (rebobinado) y 2124593 (espiras rotas)

5.4 Motor General Electric FM132MX

Este motor, aunque posee una potencia similar a los motores Indar y se ha encontrado trabajando bajo las mismas, se lo ha decidido analizar por separado ya que este motor ha poseído una vida de operación en la industria aparte de ser de otro fabricante.

Se llevó a cabo tres tipos de pruebas sobre el como son, la de resistencia de aislamiento la de absorción dieléctrica y la determinación de su índice de polarización (I.P.)

La tensión de prueba aplicada se la ha realizado en función de norma IEEE-43-2013 de forma muy similar a la establecida el punto 5.1 para este caso igualmente de 500V.

5.4.1 Resistencia de aislamiento

En las figuras 65 se puede observar la gráfica obtenida de la resistencia del aislamiento al aplicar la tensión de 500V por el tiempo de un minuto. En estas gráficas previamente se ha realizado la corrección de su temperatura de forma muy similar a la establecida en el punto 5.1.1 el coeficiente K_t resulta ser de 0.84 a 27 °C.

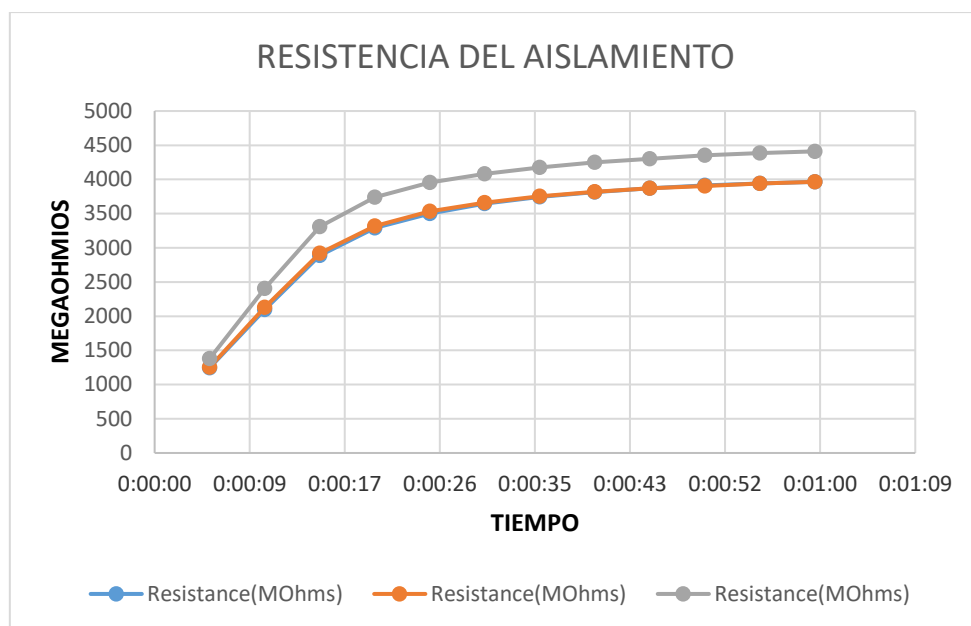


FIGURA 65. Resistencia del aislamiento entre cada fase y tierra en el motor General Electric FM132MX corregidos a 40 grados

Una de la característica que destaca es la escasa desviación que poseen las gráficas entre sí, además, la pendiente de curva que poseen estos motores es baja, lo cual no resulta extraño si las comparamos con las pendientes de curva de los motores Indar ya que se han encontrado funcionando en condiciones similares, adicional a ello hay que considerar la degradación que ha sufrido su aislante durante su vida útil en el sector industrial. Por lo descrito con anterioridad, se podría decir que el sistema aislante de este motor se encuentra contaminado y con un cierto grado de humedad por la rapidez que se estabiliza la curva de la resistencia de aislamiento.

Un valor adicional a estudiar es la resistencia mínima que deberían poseer estos motores, la resistencia más baja obtenido en las fases de este motor se sitúa alrededor de los 4000 Megohmios para el motor 8013153, correspondiente al caso más crítico. La norma IEEE 43-2013 establece un mínimo de 100 Megohmios Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970.

5.4.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)

Los valores obtenidos durante la prueba D.A.R. se muestran en la tabla 22, la prueba se la realizado de idéntica forma descrito al punto 5.1.2 tanto en valor de tensión como de tiempo.

Tabla 22. Valores de resistencia de absorción dieléctrica de cada una de las fases en el motor General Electric FM132MX

MOTOR GENERAL ELECTRIC FM132MX					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	3644	3964	1.0877	1.25	Deficiente
Fase v	3661	3964	1.0827	1.25	Deficiente
Fase w	4082	4410	1.0804	1.25	Deficiente

En la tabla 22 se observa que los valores de D.A.R entre las fases del motor son similares variando muy poco esto se debe al que la tendencia del comportamiento y valores de resistencia muy próximos entre sí, sin embargo, ninguna de las tres fases supera el valor mínimo recomendado por lo que el sistema aislante se encuentra deteriorado.

5.4.3 Índice De Polarización

Esta prueba se realizó conectando las tres fases en estrella y aplicando una tensión de 500 voltios a sus devanados. En figura 66 se puede observar la curva obtenidas durante el ensayo.

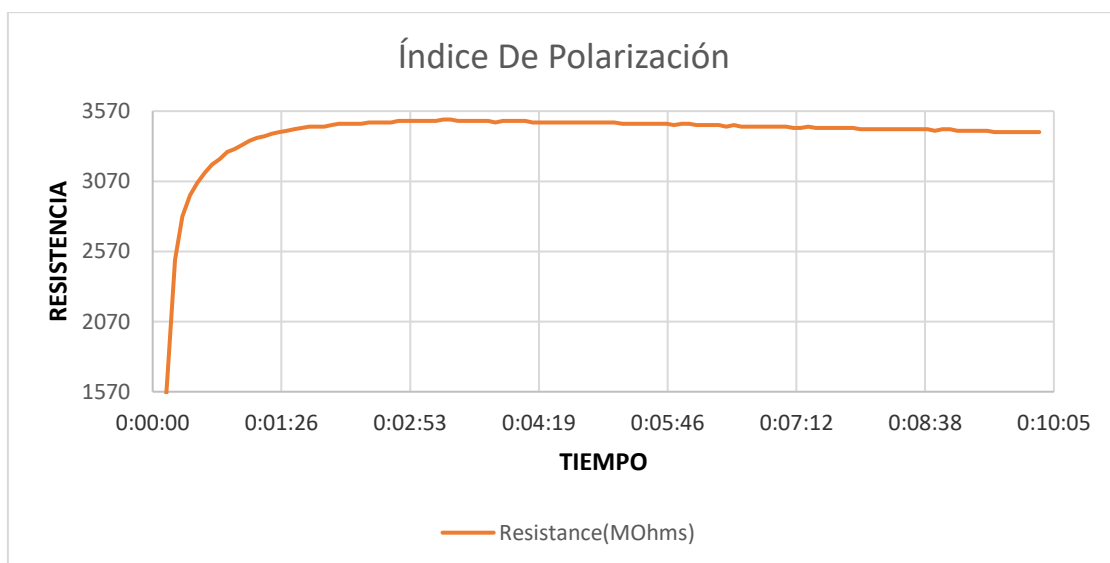


FIGURA 66. Curva de índice de polarización de los motores asíncronos siemens General Electric FM132MX.

En la tabla 23, se muestra el valor obtenido del I.P., comparándolos con el valor mínimo necesario que deberían poseer, por lo tanto, es necesario conocer el tipo de aislamiento que poseen estos motores. Para ello nos basaremos en la información disponible en la tabla 10 obtenidas de sus placas de características, en la que se describe que estos motores poseen un aislamiento clase F por lo tanto el valor mínimo de I.P. sería de 2.0. con IEEE 43-2013.

Tabla 23. Valores de índice de polarización en una conexión estrella- tierra en el motor asíncronos siemens General Electric FM132MX

MOTOR General Electric FM132MX					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min MΩ	Resistencia 10 min MΩ	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	3300	3420	1.03	2.0	Bueno

De la tabla 23, se determina que el valor máximo del IP es de 1.03 resultando bajo en relación al valor de 2.0 que establece la norma por lo cual resultaría el sistema aislante deficiente, además la gráfica 66 presenta una pendiente que se ha estabilizado a los pocos minutos posiblemente por la contaminación y humedad presente en el interior del motor.

5.5 Motores Siemens 1LA7090-4AA10 Y 1LE10011AB422AH4

Se llevó a cabo tres tipos de ensayos sobre los motores asíncronos siemens 1LA7090-4AA10 y 1LE10011AB422AH4, pese a que el primer motor se encuentra más relacionado con los motores 1LA2090-4AA10, se ha decidido compararlos entre sí por la baja resistencia que su sistema aislante presenta, es decir inferior a los 5 Gigaohmios. Se ha efectuado sobre ellos, la prueba a de resistencia de aislamiento la prueba de absorción dieléctrica y la determinación de su índice de polarización (I.P.).

La tensión de prueba aplicada a los tres motores se la realiza en función de norma IEEE-43-2013 de forma muy similar a la establecida el punto 5.1 para este caso igualmente de 500V

5.5.1 Resistencia de aislamiento

En las figuras 67 se puede observar las gráficas obtenidas de la resistencia del aislamiento de los motores, al aplicar la tensión de 500V por el tiempo de un minuto. En estas gráficas previamente se ha realizado la corrección de su temperatura de forma muy

similar a la establecida en el punto 5.1.1 que para este caso también el coeficiente K_t resulta ser de 0.84 a 27 °C.

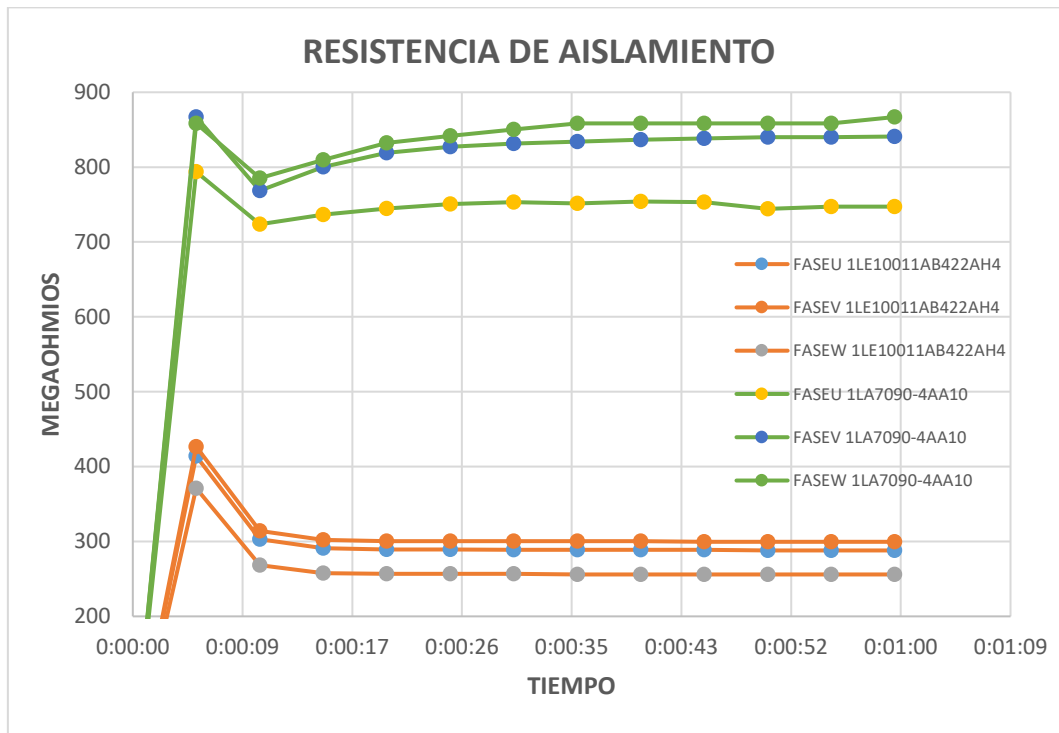


FIGURA 67. Resistencia del aislamiento entre cada fase y tierra en los motores síncronos Indar 11384 13382 11380 corregido a 40 grados

Al comparar las curvas de resistencia de aislamiento vemos una enorme diferencia entre los motores 1LA7090-4AA10 Y 1LE10011AB422AH4, lo cual no resulta sorprendente al tratarse de dos motores diferentes, pero a diferencia del primero que es un motor usado que posee más de 15 años, el segundo es completamente nuevo sin ningún uso, encontrándose completamente sellado. Resulta inusual que el motor 1LE10011AB422AH4 que es nuevo y de una potencia que dobla al 1LA7090-4AA10 posea una tercera parte de la resistencia que este presenta, esta diferencia es súbita al compararlo con los motores de la familia 1LA2090-4AA10 quienes en algunos casos llegan a poseer una diferencia superior a 100 veces su resistencia de aislamiento.

Por otro lado, se observa que las curvas del motor 1LA7090-4AA10 poseen una pendiente muy próxima a cero en sus tres fases, esto se debe al tipo de materiales usados como soporte y aglutinante en el sistema aislante que provoca que este polarice rápidamente. No es el mismo caso para el motor 1LA7090-4AA10 que presenta una pendiente baja por deterioro.

Un valor adicional a estudiar es la resistencia mínima que deberían poseer estos motores, la resistencia más baja obtenido en las fases de estos motores se sitúa alrededor

de los 250 Megohmios para el motor 1LE10011AB422AH4, correspondiente al caso más crítico. La norma IEEE 43-2013 establece un mínimo 100 Megohmios Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970.

5.5.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)

Los valores obtenidos realizando la prueba DAR a los motores 1LA7090-4AA10 Y 1LE10011AB422AH4 se muestran en la tabla 1, la prueba se la realizado de idéntica forma descrito al punto 5.1.2 tanto en valor de tensión como de tiempo.

Tabla 24. Valores de resistencia de absorción dieléctrica de cada una de las fases en los motores sincrónicos Indar 11382, 11384 y 13380

MOTOR ASÍNCRONO 1LE10011AB422AH4					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	288	287	0.9970	1.25	Deficiente
Fase v	300	299	0.9971	1.25	Deficiente
Fase w	256	255	0.9967	1.25	Deficiente
MOTOR ASÍNCRONO 1LA7090-4AA10					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	753	747	0.9981	1.25	Deficiente
Fase v	831	840	1.0111	1.25	Deficiente
Fase w	850	866	10198	1.25	Deficiente

Se puede observar que el valor D.A.R. para ambos motores es bajo incluso para el motor nuevo que no presenta ningún problema en su aislamiento, producto de la rápida polarización de su sistema aislante. Si se desconociera el historial de este equipo se lo recomendaría que se efectúa una limpieza y secado de su aislamiento generando costos innecesarios y acortando su vida útil. Los valores bajos de D.A.R del motor 1LA7090-4AA10 sugiere que este se encuentra contaminado.

El motor 1LE10011AB422AH4 es un caso especial de acuerdo a la norma IEEE 43-2013, por lo tanto, no se recomienda basarse en ninguno de los valores dispuestos para el I.P. o D.A.R., por el contrario, sugiere basarse en el comportamiento y evolución de la resistencia de aislamiento a más de la experiencia que posea el equipo de mantenimiento para poder dar un diagnostico fiable de lo que sucede en el interior de este motor.

5.5.3 Índice De Polarización

Esta prueba se realizó conectando las tres fases en estrella y aplicando una tensión de 500 voltios a sus devanados. En la figura 68 se puede observar las curvas obtenidas durante el ensayo. Para poder apreciar mejor las diferencias entre ellas, a la curva de resistencia del motor 1LA7090-4AA10 se le ha restado 300 MΩ a cada punto

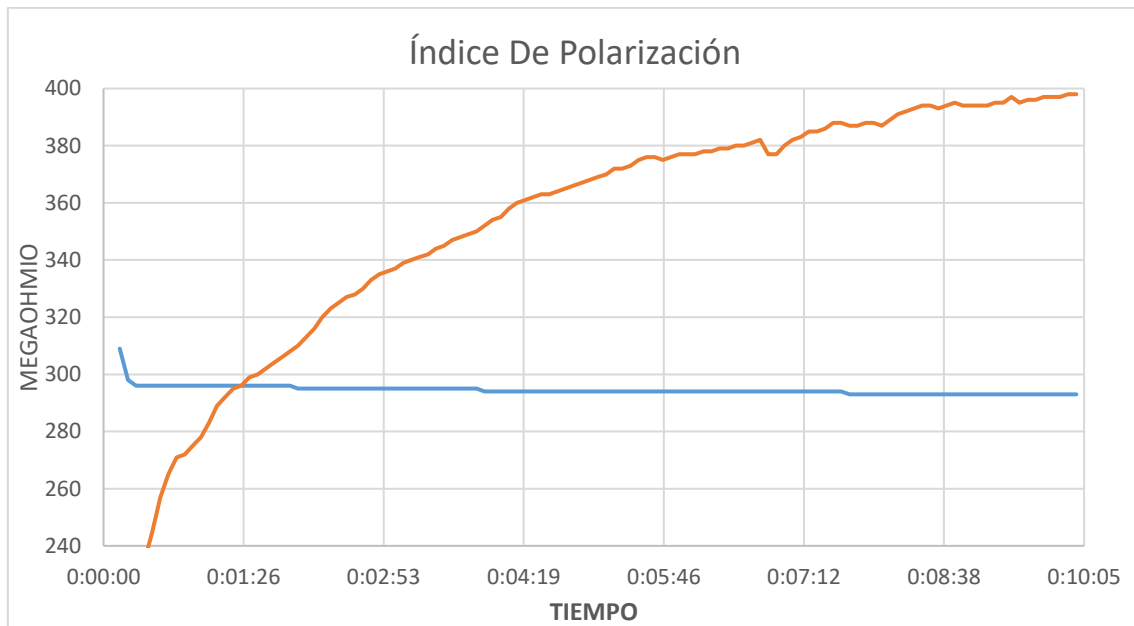


FIGURA 68. Curva de índice de polarización de los motores síncronos Indar 11384, 11382 y 11380.

Al comparar las curvas obtenidas al realizar la prueba del I.P. entre los motores, la perteneciente al motor 1LE10011AB422AH4 es casi una línea recta, producto de la rápida polarización de su aislamiento, sin embargo, la curva perteneciente al motor 1LA7090-4AA10 posee una pendiente más pronunciada, la cual a pesar de haber alcanzado los 10 minutos no ha llegado a estabilizarse

En la tabla 25, se muestran los valores obtenidos del I.P., para determinar cuál debería ser su valor recomendable, es necesario conocer el tipo de aislamiento que poseen estos motores. Para ello nos basaremos en la información disponible en la tabla 11 y 10, obtenidas de la placa de características, en la que se describe que estos motores poseen un aislamiento clase B por lo tanto el valor mínimo de I.P. sería de 2.0. Según IEEE 43-2013.

Tabla 25. Valores de índice de polarización en una conexión estrella- tierra en los motores
siemens 1LA7090-4AA10 Y 1LE10011AB422AH4

MOTOR ASÍNCRONO SIEMENS 1LA7090-4AA10					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min	Resistencia 10 min	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	296	293	0.99	2.0	Deficiente
MOTOR ASÍNCRONO SIEMENS 1LE10011AB422AH4					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min	Resistencia 10 min	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	583	698	1.21	2.0	Deficiente

De la tabla 25, se extrae que el valor máximo para el motor 1LE10011AB422AH4 se encuentra muy por debajo del mínimo recomendado como se ha dicho antes el valor I.P. para este tipo de motores no es muy relevante, pero resulta interesante la comparar su valor I.P. con respecto al del motor 1LA7090-4AA10 el cual a pesar de no encontrarse sellado y con su aislamiento ligeramente deteriorado y contaminado presenta un valor superior.

5.6 Motor Zaldi

Este motor se lo decidió realizar por las pésimas condiciones en las cuales se encuentra. Se llevó a cabo tres tipos de pruebas sobre el como son, la de resistencia de aislamiento la de absorción dieléctrica y la determinación de su índice de polarización (I.P.)

La tensión de prueba aplicada se la ha realizado en función de norma IEEE-43-2013 de forma muy similar a la establecida el punto 5.1 para este caso igualmente de 500V.

5.6.1 Resistencia de aislamiento

En las figuras 69 se puede observar las gráficas obtenidas de la resistencia del aislamiento al aplicar la tensión de 500V al aislamiento por el tiempo de un minuto. En estas gráficas previamente se ha realizado la corrección de su temperatura de forma muy similar a la establecida en el punto 5.1.1 el coeficiente K_t resulta ser de 0.84 a 27 °C.

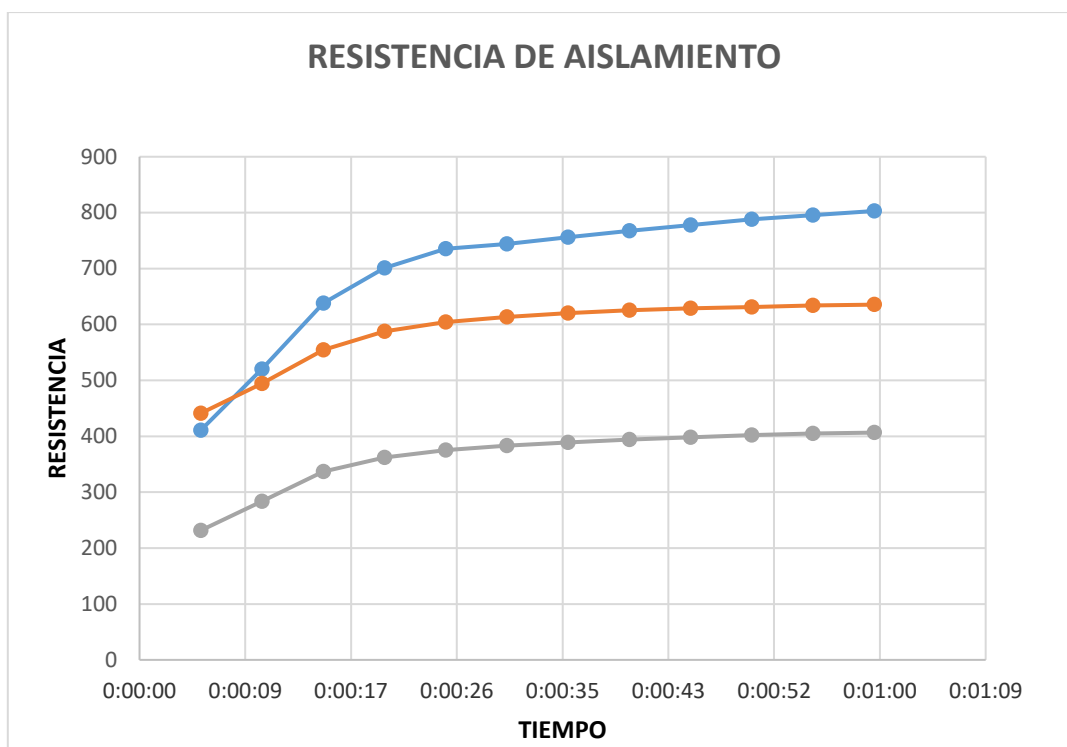


FIGURA 69. Resistencia del aislamiento entre cada fase y tierra en el motor Zaldi corregidos a 40 grados

Una de la característica que destaca es la escasa desviación que poseen las gráficas entre sí, además, la pendiente de curva que pose es muy baja en las tres fases. Por lo descrito con anterioridad, se podría decir que el sistema aislante de este motor se encuentra deteriorado.

Un valor adicional a estudiar es la resistencia mínima que deberían poseer estos motores, la resistencia más baja obtenido en las fases de este motor se sitúa alrededor de los 4000 Megohmios para el motor 8013153, correspondiente al caso más crítico. La norma IEEE 43-2013 establece un mínimo de 100 Megohmios Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970.

5.6.2 Resistencia de absorción dieléctrica (DAR)

Los valores obtenidos durante la prueba D.A.R. se muestran en la tabla 26, la prueba se la realizado de idéntica forma descrito al punto 5.1.2 tanto en valor de tensión como de tiempo.

Tabla 26. Valores de resistencia de absorción dieléctrica de cada una de las fases en el motor Zaldi.

MOTOR GENERAL ELECTRIC FM132MX					
FASE	Resistencia 30 s	Resistencia 60 s	D.A.R.	Valor min. DAR	Estado
Fase u	744	802	1.0791	1.25	Deficiente
Fase v	613	635	1.0356	1.25	Deficiente
Fase w	382	406	1.015	1.25	Deficiente

En la tabla 26 se observa que los valores de D.A.R entre las fases del motor son similares variando muy poco esto se debe a la tendencia del comportamiento de la curva en cada fase, sin embargo, ninguna de las tres fases supera el valor mínimo recomendado por lo que se puede decir que el sistema aislante se encuentra deteriorado, lo que es fácil de identificar únicamente observando el estator del motor ver figura 71.

5.6.3 Índice De Polarización

Esta prueba se realizó conectando las tres fases en estrella y aplicando una tensión de 500 voltios a sus devanados. En figura 70 se puede observar la curva obtenidas durante el ensayo.

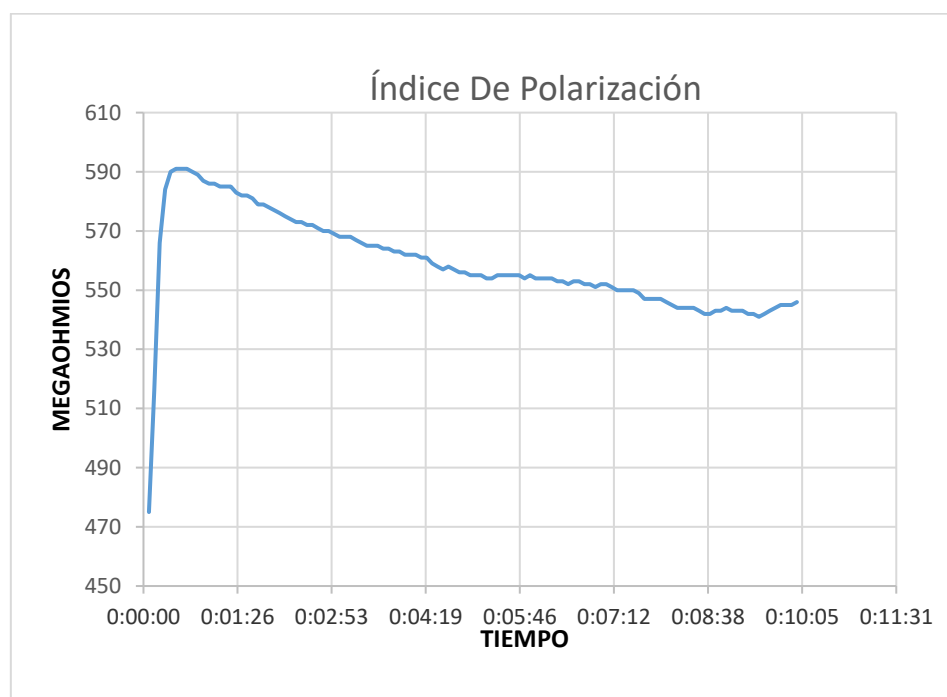


FIGURA 70. Curva de índice de polarización de los motores asíncronos Zaldi.

En la tabla 23, se muestra el valor obtenido del I.P., comparándolos con el valor mínimo necesario que deberían poseer, por lo tanto, es necesario conocer el tipo de aislamiento que poseen estos motores. Para ello nos basaremos en la información disponible en la tabla 14 obtenidas de su placa de características, en la que se describe que estos motores poseen un aislamiento clase B por lo tanto el valor mínimo de I.P. sería de 1.5 con IEEE 43-2013.

Tabla 27. Valores de índice de polarización en una conexión estrella- tierra en los motores asíncronos siemens 1LA2004AA10.

MOTOR ASÍNCRONO 2124655					
CONEXIÓN	Resistencia 1 min MΩ	Resistencia 10 min MΩ	I.P.	Valor min. I.P.	Estado
Estrella	586	546	1.09	1.5	Deficiente

De la tabla 27, se determina que el valor máximo del IP es de 1.09 resultando bajo en relación al valor de 1.5 que establece la norma por lo cual resultaría el sistema aislante deficiente, además la gráfica 67 presenta una pendiente negativa por lo que su aislamiento presenta un deterioro considerable, adicionalmente el aislamiento presenta contaminación por lo que ha pasado sin protección en contacto directo con el ambiente por muchos años.

En la figura 68 se puede observar el estado interno del en el cual se encuentra el estator de este motor.

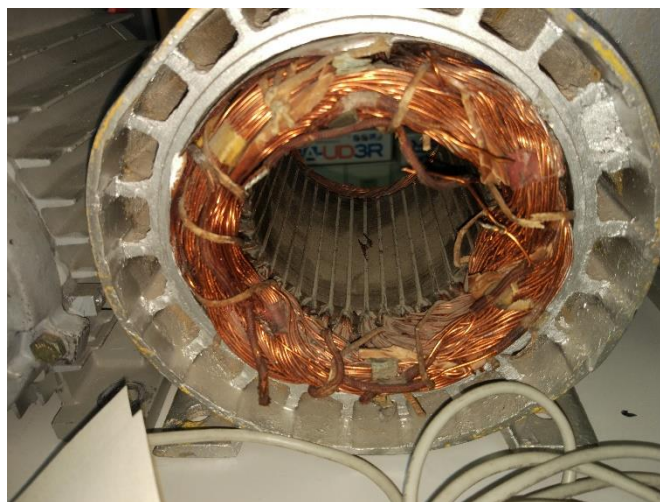


FIGURA 71. Estado en el que se encuentra el estator del motor Zaldi

5.7 Prueba Hi-Pot en motores Zaldi, 1LA7090-4AA10 y 1LE10011AB422AH4.

Para realizar esta prueba es necesario conocer la tensión de línea con la cual trabajan estos motores, de las tablas 11, 13, 14 se conoce que estos motores se les puede aplicar una tensión máxima en estrella de 400 V, aplicado la ecuación (5.2), se determina el valor máximo de alto voltaje que se aplicara a los motores durante la prueba Hi-Pot.

$$T_{max_{Hi-Pot}} = 2 * Ul + 1000 \quad (5.2)$$

$$T_{max_{Hi-Pot}} = 2 * (400 V) + 1000 = 1800 V$$

El megger MIT 1025 generara escalones proporcionales a partir de la tensión final, es decir, a los 1800V lo divide para 5 y aplicara un incremento de tensión de 360 V durante 5 intervalos de tiempo, en nuestro caso cada intervalo será de un minuto ya que se ha establecido un tiempo máximo de prueba de 5 minutos. En la figura 72 se puede observar el valor de tensión como duración que aplicara para cada prueba.

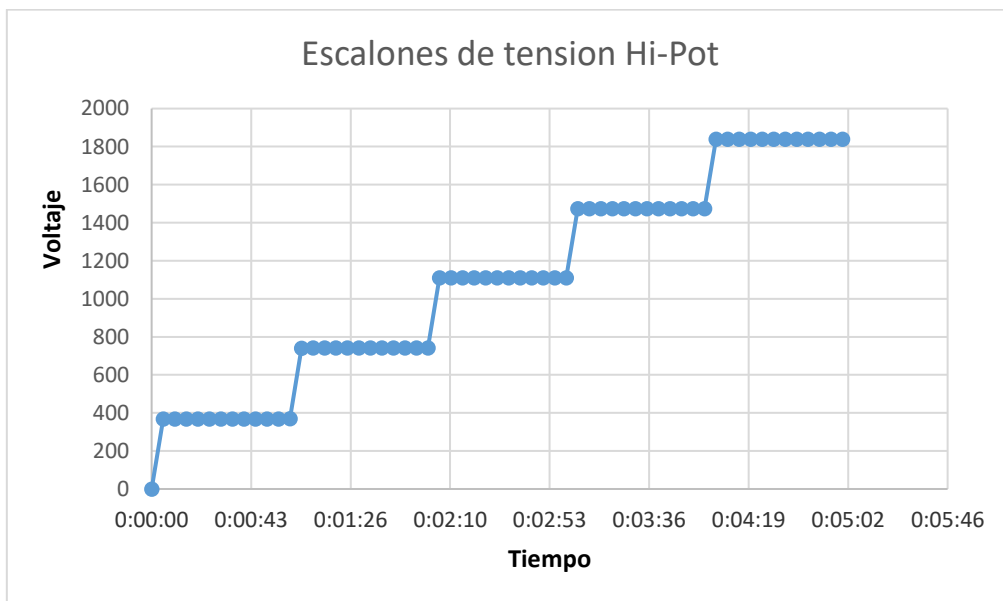


FIGURA 72. Escalones de tensión, Prueba Hi-Pot.

5.7.1 CURVAS DE CORRIENTE

En la gráfica 73, se muestra las curvas obtenidas durante la prueba Hi-pot en el motor 1LE10011AB422AH4, el cual se caracteriza por ser nuevo y encontrarse con un sistema de aislamiento sin ningún tipo de deterioro.

Un sistema aislante en perfectas condiciones describe una curva suavemente ascendente, es precisamente lo que describen las curvas de las tres fases de los bobinados de este motor que presente una relación proporcional entre el incremento de voltaje y corriente describiendo unas líneas rectas muy próximas entre sí.

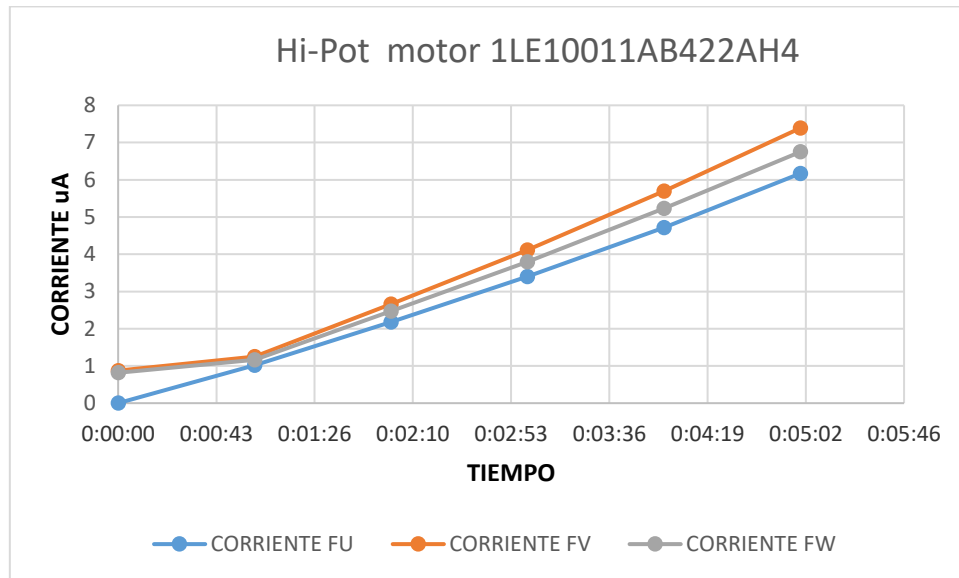


FIGURA 73. Curva obtenida Durante la Prueba Hi-Pot del motor 1LE10011AB422AH4.

Por el otro lado la figura 74 muestra las curvas obtenidas al realizar la prueba en el motor Zaldi, se puede observar como las fases “v” y “w” del motor presentan desviación mayor y un crecimiento acelerado de su intensidad de corriente. Conforme aumenta el voltaje aplicado en estos motores vemos que la desviación es mayor, en especial en la fase ‘w’ que muestra un crecimiento muy brusco de intensidad una vez aplicado el escalón final, por lo que podríamos estar acercando a la tensión de fallo del aislamiento, por seguridad jamás se intentó llegar a determinarla porque podría resultar riesgoso sabiendo que este motor presenta un sistema aislante deficiente.

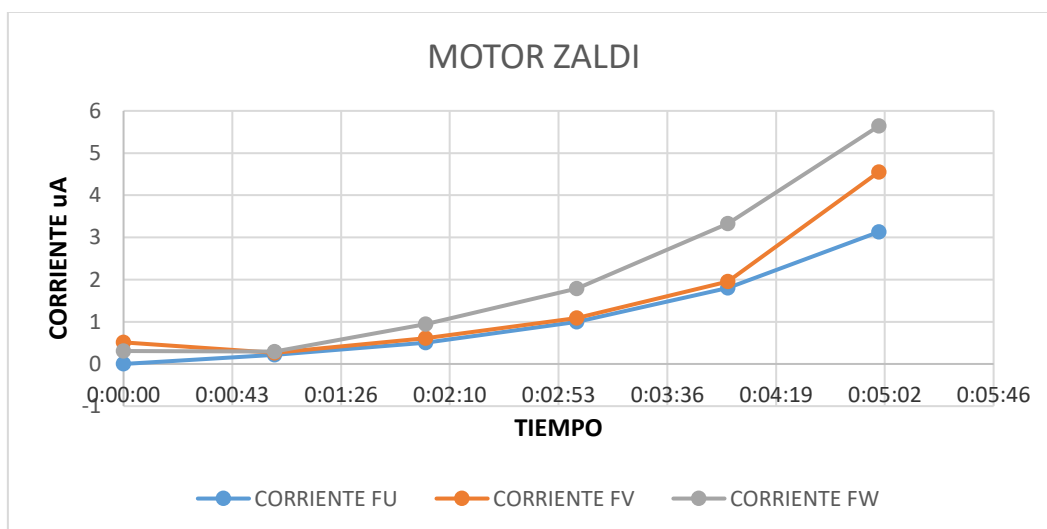


FIGURA 74. Curva obtenida Durante la Prueba Hi-Pot del motor Zaldi.

A pesar de que el motor 1LA7090-4AA10, presente un deterioro, sus curvas no muestran un incremento tan brusco (ver figura 75), como se puede ver en el motor Zaldi, sino más bien describiendo una curva suavemente ascendente muy próximos entre sí, por lo que se descarta la existencia de falla entre los conductores y el panel de la ranura del núcleo estatórica, por lo que la falla existente en este motor se puede deber más a contaminación.

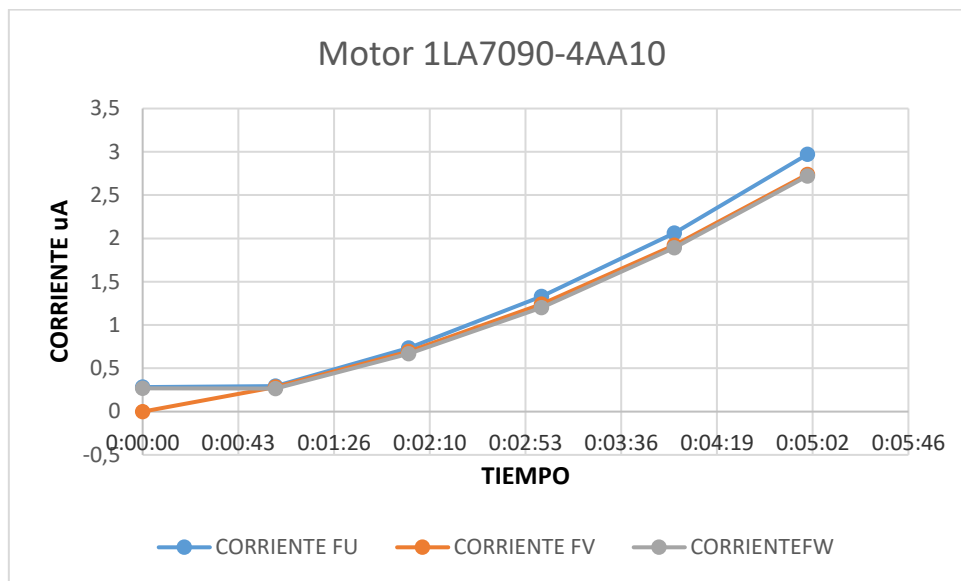


FIGURA 75. Curva obtenida Durante la Prueba Hi-Pot del motor siemens 1LA7090-4AA10

VI Coste De Implantación

Los beneficios obtenidos por medio de la implantación de los métodos de revisión offline en la industria son inmediatos, en la tabla 28, se intenta dar una idea de los costes de la adquisición del equipo, y demás insumos mínimos que tendrían que asumir la empresa para poder efectuarlos.

Tabla 28. Costes de adquisición del equipo para la realización de los métodos offline.

COSTOS DE ADQUISICIÓN			
Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
Costo de Megger	1	3500	3500
Costo de calibración	1	200	200
Costo de capacitación	3	100	300
Polímetro profesional	2	100	200
Costo de ordenador	1	500	500
Coste total de adquisición			4500

La tabla 29, muestra los costos de mano de obra, estos resultan bajo ya que se considera que el equipo de mantenimiento es quien realiza tanto las pruebas, como diagnóstico de resultados lo que disminuye en gran medida el precio, este costo se elevaría si se consideraran los gastos adicionales de desplazamiento, envío de informes, y utilización de equipo, coste del profesional cualificado, al contratar una empresa externa que llegue a la empresa a realizar estos ensayos.

Tabla 29. Costos de mano de obra

COSTOS DE MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Precio (€/h)	Tiempo x máquina (h)	Número de máquinas	Total (€)
Costo de mano de obra	2	30	1	12	720
Costo de análisis de resultados	1	60	1	12	732
Coste total de manos de obra					1452

En la tabla 30 únicamente se ha considerado que se ha realizado la reparación de dos motores de mediana potencia entorno a los 200-260 CV, sobre los que se ha realizado un rebobinado y un sumergimiento en resina generando un coste 5700 euros para la empresa, este coste tiende a ser mayor conforme aumenta la potencia del motor, es decir en grandes industrias en donde se utilizan motores de elevada potencia, los costes de reacondicionamiento llegan a superar los 5000 euros, únicamente en reparación sin haber considerado las pérdidas en producción que elevarían mucho más la cifra mencionada. Al comparar estos valores con 6000 euros correspondiente establecimiento

del sistema y la mano de obra durante el primer año de ejecución la técnica llega a ser completamente rentable, debido a que los gastos totales se ven completamente amortizados durante su primer año de implantación

Tabla 30. Coste de rebobinado como un sumergimiento en resina en motores de mediana potencia.

COSTE DE REPARACIÓN MOTORES DE MEDIANA POTENCIA				
Descripción	Potencia (CV)	Cantidad	Precio	Total (€)
Bobinado	260	1	3200	3200
Sumergimiento en Resina	200	1	2500	2500
Coste total de reparación				5700

VII Conclusiones

- La pendiente de la curva de resistencia de aislamiento es un parámetro fundamental para poder establecer el estado en el cual se encuentra el sistema aislante en la mayoría de motores, a excepción, de aquellos motores que polarizan rápidamente, como en el caso de motores nuevos que utilizan nuevos materiales y resinas en su aislante dotando a su pendiente de curva una tendencia a 0, pudiendo provocar un diagnóstico erróneo del estado en el cual se encuentra el motor.
- Durante la prueba I.P. resulta conveniente evaluar cada fase de un motor eléctrico por separado, para poder realizar un diagnóstico más fiable. Si se desea conocer de manera general el estado del sistema aislante, se puede recurrir a la conexión estrella entre los bobinados, pero debe tomarse muy en cuenta que cualquier pequeña desviación que pueda presentar en su curva puede traducirse en una falla considerable si se evalúa cada fase por separado.
- La resistencia de aislamiento no desciende únicamente por encontrarse su aislamiento contaminado o húmedo, existen ocasiones en el factor humano juega un papel importante, como es el caso del motor rebobinado, que presenta una curva de resistencia de aislamiento muy baja en comparación con motores similares, producto de un mal proceso de reacondicionamiento.
- La mayoría de los motores Indar presentan un aislamiento con un I.P. bajo, esto se debe a que son utilizados para fines didácticos, y se realizando sobre ellos una serie de estudios y pruebas sobre ellos que deterioran progresivamente la vida de su sistema aislante, además llevan prestando servicio por más de 30 años jamás se ha realizado un mantenimiento sobre estos motores ya que no se los utiliza en ningún proceso o sistema, ni forman parte crucial de los mismos.
- En la mayoría de los casos, el estado de limpieza y sequedad medido a través del DAR y/o IP en muchos motores es muy mejorable, dado se puede aplicar en ellos un mantenimiento de limpieza interna con el propósito de aumentar las cifras obtenidas.
- No se debe confiar completamente en los resultados obtenidos durante la ejecución de un ensayo, por ejemplo, existen zonas en que la curva de resistencia de aislamiento, que presenta alguna variación considerable y esta se

ha debido exclusivamente a la existencia alguna en el aparato de medido, muchas de las veces es necesario realizar algunas pruebas para confirmar el hallazgo.

- Después de cada prueba de aislamiento es necesario realizar la despolarización de su sistema aislante, de lo contrario, cada vez que se efectúe una prueba los valores obtenidos no serán fiables por lo que se puede hacer un diagnóstico erróneo.
- Jamás se obtendrán dos curvas idénticas, pero si similares, al realizar una prueba offline, debido a que el aislamiento presenta una serie de impurezas que provoca que el camino que toma la corriente en su interior sea diferente.
- En un ensayo Hi-Pot cualquier variación en la tasa de crecimiento intensidad corriente debe ser revisado meticulosamente para establecer si nos encontramos frente a la tensión de ruptura y no producir daño al motor.
- Si comparamos los valores obtenidos de I.P. como D.A.R. en relación con los presentes en la reforma IEEE 43-2013, nuestro motor presentara unas pésimas condiciones, por lo que esta norma se encuentra obsoleta frente a los nuevos avances en ingeniería de materiales, que hacen que el comportamiento que presenta la curva de resistencia de aislamiento en los nuevos sistemas aislantes sean muy estables.
- En el capítulo dos se describió un gran número de técnicas utilizadas para diagnosticar fallas en motores, pero ninguna de ellas a excepción de las técnicas Off-line permiten tener una idea del estado en el cual se encuentra el aislamiento, salvo que el aislamiento en el motor se encuentre gravemente deteriorado.

Bibliografía:

- [1] L.M. Cerdá, “El motor eléctrico”, en Instalaciones *Eléctricas Y Automatismos*, primera edición, España: edit. Paraninfo,2014, cap. 5, pág. 140.
- [2] J. Roldan, *Motores de corriente continua*, primera edición, España: edit. Paraninfo,2014.
- [3]G. Harper, *El ABC de las maquinas eléctricas III*, primera edición, México: edit. Limusa, 2013, pág. 20.
- [4] T. Wildi, ” Máquinas de inducción trifásicas”, en *Maquinas eléctricas y sistemas de potencias*, sexta edición, México: edit. Pearson,2007, cap. 13, pág. 263
- [5] R. Widman, “La Vida Útil de Rodamientos y Cojinetes Lubricados por Grasa”, Widman internacional, Feb., 2008
- [6] NSK Bearing Doctor, *Diagnóstico Rápido de Fallas en Rodamientos*, NSK Spain S.A.
- [7] WEG, *Daños en los bobinados*, NSK Spain S.A., Cod:50036032, 2012
- [8] Motortico, *Rotores con barras rotas*, Motortico, marzo, 2014.
- [9] P. Bethel, *Análisis por zonas de falla*, PdmA corporation, FL 33610
- [10] P. N. Saavedra, *Diagnóstico del desalineamiento de ejes en máquinas acopladas a través del análisis de vibraciones*, Chile: edit. Universidad Concepción, 2015.
- [11] Wiedenbrug, "On-Line and Off-Line State of the Art Preventive Maintenance of Electrical Motors," *Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference* 2001.
- [12] F. A. Carvajal, *Diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión*, IIE, marzo- abril 1999
- [13] J.P. Souris, “Métodos e instrumentos”, *El mantenimiento, fuente de beneficios*, primera edición, España: edit. Díaz De Santos,1992, cap. 5, pág. 112.
- [14] Campbell, Reece, “Fotosíntesis”, *Biología*, séptima edición, España: edit. Panamericana, cap. 10, pág.186.
- [15] S. Burbano, E. Burbano, C. Gracia, *física general*, trigésima segunda edición, España: edit. Tebar, 2003
- [16] T. Mosca, “Propiedades y procesos térmicos”, *Física para la ciencia y tecnología*, quinta edición, España: edit. Reverté. Vol. 1c, cap. 20, pág.597
- [17] P. Allen, “Propiedades y transformaciones térmicas”, *física preuniversitaria*, España: edit. Reverté, Vol. 1, 2006, cap. 13, pág. 363.
- [18] M del barrio, E. bravo, S. Diez, *Termodinámica Básica, Ejercicios*, primera edición, España: edit. U.P.C.,2006, pág. 82.
- [19] A. de Paula, J. de paula, “teoría cuántica, introducción y principios,” en *Química física*, octava edición, España: edit. Panamericana, cap. 8, pág. 246.

- [20] Guía termografía para mantenimiento predictivo, FLIR, España
- [21] D. L. Balegeas, "Termografía Infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva," cuarta conferencia panamericana de END, Buenos aires, Argentina, octubre 2007.
- [22] A. Besa, J. Carballeira, "Medida de la señal," *Diagnostico y corrección de fallos de componentes mecánicos*, primera edición, España: edit. U.P.V.,2015, cap. 4, pág. 97-108.
- [23] W. Tomasi, "Introducción a las comunicaciones electrónicas", *sistemas de comunicaciones electrónicas*, cuarta edición, México: edit. Pearson, 2003, cap. 1 pag.15.
- [24]R. Puche, "Nuevos métodos de diagnosis de excentricidad y otras asimetrías rotóricas en máquinas eléctricas de inducción a través del análisis de la corriente estatórica," disertación Ph.D., D.I.E, U.P.V., Valencia, España, 2008
- [25] J. Pons, "Metodología para el diagnóstico de averías en motores de inducción mediante el análisis de corrientes estatóricas transitorias utilizando átomos tiempo - frecuencia," disertación Ph.D., D.I.E, U.P.V., Valencia, España, 2013.
- [26]R. Flores, I. Asiaín," Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales", SEPI-ESIME-IPN, México D.F., México,2011
- [27] O. Carrillo, "Diseño y construcción de un sistema para el monitoreo de condición de generadores síncronos y motores trifásicos de inducción", Tesis de grado, F.I.E.E, E.P.N., Ecuador, 2011.
- [28] IEC Publication 270, Ed. 3.0. "High-voltage test techniques-Partial discharge measurement", Ed. 2, 2000.
- [29] A. Mor, "Nueva metodología de la medida de descargas parciales en cables de alta tensión.," disertación Ph.D., I.T.E., U.P.V., Valencia, España, 2012.
- [30] Motortico, *Monitoreo Off-Line de descargas parciales en máquinas rotativas*, Motortico, septiembre, 2015.
- [31]Inducor, *Diagnostico por descargas parciales en generadores y motores dirigido a supervisores y dueños de grandes maquinas la realidad y el oportunismo*, Inducor electrical testing group, 2011
- [32] L. Castro, "Diagnóstico del aislamiento principal de bobinas estatóricas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en laboratorio", disertación Ph.D., D.I.E, Universidad del valle, Cali, Colombia, 2014.
- [33] Megger MIT515, MIT525, MIT1025 y MIT1525, Megger, 2016.
- [34] IEEE Standar 43-2013: IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, NY, 2013
- [35]F. González, "Mantenimiento predictivo como nueva Mantecnología," *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*, segunda edición, España: edit. F.C., 2005, cap. 5, pág. 195

- [36]Cristina S. Carreras: Ensayos de la calidad del aislamiento en máquinas eléctricas rotativas. Revista de mantenimiento, septiembre 1995.
- [37]G. E. Harper, “Pruebas a transformadores,” *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*, México: edit. Limusa, 2004, cap. 3 pág. 115.
- [38] *Procedimiento de pruebas de campo para equipo primario de subestaciones de Distribución*, Comisión Federal de Electricidad, México, 2013.
- [39] Motortico, *Prueba de Hi-Pot en CD en máquinas rotativas*, Motortico, marzo, 2014.
- [40] M. Fernández Cabanas, M. García Melero, G. Alonso Orcajo, J.M. Cano Rodríguez, J. Solares Sario. “Ensayos para el mantenimiento del sistema aislante en máquinas eléctricas rotativas,” *Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas*. Primera edición, España: edit. Marcombo, 2015, cap.6, Pág. 230-250.
- [41] J. Martínez, “Método para evaluar la calidad del aislamiento en terminales de mediana tensión a partir de pruebas Hi-Pot”, M.S. thesis, U.A.N.L., México, 2002.
- [42] IEEE Standard 95-2002: IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Direct Voltage. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, NY, 1977; 2002.
- [43] IEEE Std 522™-2004 “IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating Current Electric Machines”, IEEE Power Engineering Society.
- [44] Sang Bin Lee, Ernesto Wiedenbrug, Karim Younsi, “Testing and Diagnostics of Induction Machines in an Industrial Environment”, ECCE 2013 Tutorial, Sept. 15-19, 2013, Denver, CO, USA.
- [45] David L. McKinnon, “Using a Fault Zone Approach for Predictive Maintenance on Motors”, PdMA Corporation.
- [46] Instituto Geográfico Nacional, “Humedad relativa media anual en España”, [online], disponible: http://www.ign.es/espmmap/mapas_clima_bach/Mapa_clima_07.htm